

DEPARTAMENTO DE SILVOPASCICULTURA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE MONTES,
FORESTAL Y DEL MEDIO NATURAL

**HUELLA DE CARBONO DE ORGANIZACIÓN Y PRODUCTO CON
ENFOQUE HÍBRIDO: MEJORAS EN EL MÉTODO COMPUESTO DE
LAS CUENTAS CONTABLES**

TESIS DOCTORAL

Autor

SERGIO ÁLVAREZ GALLEGO

Director

AGUSTÍN RUBIO SÁNCHEZ

MADRID, 2014

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de
la Universidad Politécnica de Madrid, el día 3 de Junio de 2014.

Presidente/a D/Dª

Vocal D/Dª

Vocal D/Dª

Vocal D/Dª

Secretario/a D/Dª

Realizando el acto de defensa y lectura de la Tesis el día
27 de Junio de 2014 en Madrid.

Calificación.....

PRESIDENTE/A

VOCALES

SECRETARIO/A

*“Primero, fue necesario civilizar al hombre en su
relación con el hombre. Ahora, es necesario civilizar al hombre
en su relación con la naturaleza y los animales.”*

VICTOR HUGO

(1802-1885)

AGRADECIMIENTOS

Dijo en una ocasión don Francisco de Quevedo y Villegas que el agradecimiento es la parte principal de un hombre de bien. Pues bien, yo no sé si soy o llegaré a ser un hombre de bien, pero sí sé una cosa: nada de lo que hoy soy, sería sin la gente que ha pasado por mi vida durante estos años de formación. Por eso, quiero mostrar mi agradecimiento a todas las personas con las que he compartido este camino.

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis, Agustín Rubio. Extraordinario profesor que ha llenado de confianza y dedicación cada rincón de mi persona. También quiero dar las gracias a todos aquellos compañeros y profesores que han colaborado conmigo en diferentes áreas de mi carrera profesional. En especial agradecer a Carmen Avilés, quien siempre ha mostrado una actitud de apoyo y empuje hacia mi trabajo, y a Sebastián Labella, por su plena disponibilidad conmigo y su trabajo lleno de buen-hacer y entusiasmo hacia el proyecto Carbonfeel. De manera general, quiero agradecer con un infinito cariño la dedicación de tantos profesores de esta Escuela que se esfuerzan por seguir mostrando a los alumnos de esta casa las oportunidades que esconden nuestros recursos naturales.

En segundo lugar, quiero agradecer a los 9 alumnos de Proyecto Fin de Carrera que han confiado en mí para desarrollar esta vocación compartida relacionada con la Huella de Carbono. Ellos han sido responsables de que pueda decir con la mayor de las sinceridades que he aprendido en un inabarcable sentido profesional y humano. El proyecto empresarial *Zamabi* ha sido el extraordinario punto de encuentro para el desarrollo de estas motivaciones e inquietudes, un vehículo cargado de buen hacer, trabajo y entusiasmo del que me he sentido en todo momento orgulloso y complacido.

En tercer lugar, quiero agradecer a todos mis amigos, tanto de la Escuela como de fuera, cada uno de los momentos que hemos compartido estos años y que han hecho de esta etapa, sin lugar a duda, una de las mejores, más felices y plenas de mi vida. En especial a Marco Blanquer, del que aprendo a cada momento y a quien parafraseo en mis grandes eventos. Gracias por tu confianza y sobre todo por tu persona. Tu compañía ha hecho que los proyectos compartidos hayan tenido luz propia, de forma que han servido como guía y punto de encuentro.

En cuarto lugar, quiero agradecer a los más próximos. En especial a Carlos Ortiz y M^a José Alonso, ellos son los que han vivido más de cerca esta etapa conmigo. Han estado siempre compartiendo los momentos de detrás del telón, alegrándose en mis ilusiones y acompañando en mis decepciones.

Por último, e incidiendo en lo más importante, quiero agradecer este trabajo a mi mujer, padres y hermanos. Ellos han sido los principales pilares de mi proyección profesional y a los que mi infinita gratitud nunca llegará a compensar toda la entrega que han hecho por mí. En especial quiero agradecerse a mi mujer Viky, la persona que más ilumina y enternece mi corazón. Ella es quien de verdad ha proporcionado el sentido y empuje necesario. Su habilidad para sorprenderme y con ello enamorarme en el día a día, la convierte en la verdadera gran merecedora de este éxito.

Quiero terminar mandando un especial recuerdo a mis abuelos y en concreto a mi abuelo Sergio, a quien probablemente debo esta vocación desde que tengo uso de razón. Su cariño hacia los bosques asturianos despertó en mí esta ilusión que a día de hoy fructifica en forma de tesis doctoral.

Por todo ello, gracias de corazón.

RESUMEN

La lucha contra el cambio climático es uno de los retos ambientales más importantes de este siglo XXI. Para alcanzar el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es necesario desarrollar herramientas aplicables a todas las actividades de la economía con las que medir el impacto generado por la actividad del hombre. La Huella de Carbono (HC) forma parte de un conjunto de indicadores desarrollados para responder a esta necesidad. Nuestra línea de trabajo parte del hecho de que la demanda de una baja HC puede ser un factor clave para estimular cambios en los hábitos de consumos y para mejorar la eficiencia en los procesos de producción. Sin embargo, una de las principales dificultades halladas al respecto es la diferencia de enfoques para el cálculo de la HC de producto y la HC de organización. De igual manera existen importantes dificultades en el establecimiento de los límites del sistema en estudio. Para asegurar el éxito de la implantación de la HC en la sociedad, es necesario el establecimiento de los mismos criterios en los distintos estudios. Por este camino, la comparabilidad esta comprometida y con ello la confianza del consumidor.

Los avances en el cálculo de HC se basan en dos propuestas ampliamente conocidas: El Análisis de Ciclo de Vida y la Extensión Ambiental del Análisis Input-Output. Ambas metodologías tienen relevantes aspectos positivos y negativos. Por lo tanto, la hibridación entre ambos enfoques supone una clara oportunidad en la búsqueda de sinergias. En respuesta a esta demanda, diferentes herramientas de enfoque híbrido están siendo desarrolladas. La investigación de esta tesis doctoral parte del avance desarrollado en la concepción del Método Compuesto de las Cuentas Contables (MC3). El MC3 es un método de análisis híbrido por niveles que desarrolla un cálculo exhaustivo de la HC de organización para el posterior cálculo de la HC de producto.

Esta investigación tiene como objetivo general evaluar el MC3 como herramienta de cálculo de la HC, válida tanto para organización como para producto. En este sentido, se analizan pormenorizadamente cuatro casos de estudios con características innovadoras. Tres de ellos empleando el MC3 en diferentes unidades de estudio: organización, producto y escenario internacional. La aplicación a organización se realiza sobre un centro universitario, permitiendo el análisis detallado de diferentes aspectos metodológicos. La aplicación a producto compara los resultados del MC3 con la aplicación tradicional de un Análisis de Ciclo de Vida. El escenario internacional se desarrolla en Brasil sobre la producción energética en un parque eólico de grandes dimensiones. Por último, el caso de estudio 4 se basa en la Extensión Ambiental del Análisis Multi-Region Input-Output. Este estudio elabora una nueva aproximación para el análisis del impacto generado por un hipotético cierre del comercio internacional.

Estos estudios son discutidos en su conjunto a fin de poner en valor las fortalezas de las innovaciones implementadas con un sentido integrador. También se proponen estrategias futuras que permitan mejorar la propuesta metodológica del MC3 con el punto de mira puesto en la internacionalización y la armonización con los estándares internacionales de la HC. Según la experiencia desarrollada, el MC3 es un método de cálculo de la HC práctico y válido para evaluar la cantidad de emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero de cualquier tipo de actividad. Una de las principales conclusiones es que el MC3 puede ser considerado una herramienta válida para el ecoetiquetado global de bienes y servicios que permita, tanto a empresas como a consumidores, funcionar como motores de cambios hacia una economía dinamizada por la búsqueda de la racionalización en el uso de los recursos.

ABSTRACT

The fight against climate change is one of the most important environmental challenges of this 21st century. To achieve the goal of reducing greenhouse gases emissions it is necessary to develop tools with the ability to be applied to all economy activities and to allow the measurement of the impact produced by human activity. The Carbon Footprint (CF) is part of a set of indicators developed to response this need. Our study works on the assumption that the demand for lower CF can be a key factor to stimulate changes in consumer patterns and to improve the efficiency of the production process. However, one of the main difficulties encountered is the difference in the implementation of same criteria in the different studies. Therefore, comparison will not be possible and consequently consumer confidence will never be achieved.

Progress in the quantification of CF is based on two widely-known proposals: The Life Cycle Analysis and the Environmentally-Extended Input-Output Analysis. Both methodologies have relevant positive and negative aspects. Therefore, a hybrid of both approaches means a clear opportunity in the search of synergies between them. In response to this demand, different tools using hybrid approach are being developed. The research carried out in this doctoral thesis starts from the progress made in the conception of the Compound Method based on Financial Accounts (MC3, using its Spanish acronym). The MC3 is a tiered hybrid method that develops a comprehensive quantification of the corporate CF for the further quantification of the product CF.

This research has as a main objective to assess the MC3 as a tool for CF quantification, valid for both corporate and product. To this end, four case studies with innovative characteristics are assessed in great detail. Three of them are relative to the use of MC3 in different case studies: corporate, product and an international scenario. The corporate implementation is developed in a university center, allowing the detailed analysis of different methodological aspects. The product implementation compares the results from the MC3 and the Life Cycle Assessment. The international scenario is developed in Brazil and energy production from a large wind farm. Finally, the 4th study case is based on the so-called Environmentally-Extended Multi-Regional Input-Output Analysis. This last study develops a new approach to assess the impact produced by a hypothetical closure in the international trade.

These studies are discussed as a whole in order to add value to the strengths with an integral sense of the innovative implementations. Moreover, future strategies to improve the MC3 approach are proposed focusing on the international and the harmonization with international standards for CF. According to the developed experience, the MC3 is a user-friendly and valid approach with the ability to assess the direct and indirect greenhouse gas emissions from any kind of activity. One of the main conclusions is that the MC3 can be considered as a valid tool for a global eco-label of goods and services that allows both business and consumers to work as driving forces of change towards an economy invigorated by the search for a rational use of resources.

ABREVIATURAS

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

FAO: Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

GEI: Gases de efecto invernadero

HC: Huella de Carbono

IPCC: Panel Intergubernamental del Cambio Climático

MC3: Método Compuesto de las Cuentas Contables

MRIO: Multi-Región Input-Output

UE: Unión Europea

UNFCCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

ÍNDICE



AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN.....	v
ABSTRACT	vii
ABREVIATURAS	ix
ÍNDICE	xi
LISTA DE FIGURAS	xxiii
LISTA DE TABLAS	xxix

INTRODUCCIÓN	1
1. Cambio Global y Desarrollo Sostenible	3
1.1. Cambio Global.....	3
1.1.1. Evidencias Cambio Global	3
1.1.2. Gases de efecto invernadero	7
1.1.3. Acuerdos internacionales.....	10
1.1.4. Criterios en la elaboración de inventarios.....	12
1.2. Desarrollo Sostenible	16
1.2.1. Evolución del concepto Desarrollo Sostenible.....	16
1.2.2. Indicadores para el Desarrollo Sostenible	18
1.2.3. Principales indicadores tipo Huella	19
2. Huella de Carbono.....	25
2.1. Origen y enfoques de la Huella de Carbono	26
2.2. Huella de Carbono y Análisis de Ciclo de Vida	29
2.2.1. Descripción general.....	29
2.2.2. Limitaciones del Análisis del Ciclo de Vida.....	32
2.3. Huella de Carbono y Análisis Input-Output	34
2.3.1. Descripción general.....	34
2.3.2. El Análisis Multi-Región Input-Output.....	36
2.3.3. Extensión Ambiental del Análisis Input-Output.....	39



2.3.4. Limitaciones del Análisis Input-Output.....	42
2.4. Huella de Carbono: Análisis Híbrido y enfoque integrado.....	43
2.4.1. Descripción del Análisis Híbrido	44
2.4.2. Propuestas existentes de Análisis Híbrido	47
2.4.3. Propuestas de enfoque integrado.....	52
2.4.4. Método Compuesto de las Cuentas Contables	52
OBJETIVOS.....	61
1. Objetivo General	63
2. Objetivos Específicos.....	63
3. Descripción y justificación de los capítulos	64
3.1. Introducción	64
3.2. Materiales y Métodos	64
3.3. Resultados.....	64
a. Huella de Carbono usando el Método de Compuesto de las Cuentas Contables. El caso de la Escuela de Ingeniería de Montes, Universidad Politécnica de Madrid	65
b. Método Compuesto de las Cuentas Contables frente al Análisis del Ciclo de Vida por Procesos en Huella de Carbono de Producto: Una comparación utilizando Palets de Madera	65
c. Huella de Carbono usando el Método Compuesto de las Cuentas Contables. El caso de los Parques Eólicos de Osorio.....	66
d. Análisis Multi-Region Input-Output. Emisiones asociadas al comercio internacional y al aislamiento de economías	66
3.4. Discusión	67
3.5. Conclusiones	67
MATERIALES Y MÉTODOS	69
1. Huella de Carbono y Análisis de Ciclo de Vida	71
1.1. Características del Análisis de Ciclo de Vida	71
1.2. Técnicas de Análisis de Procesos y Análisis de Proyección.....	72



1.3. Herramientas y bases de datos	74
2. Huella de Carbono y Extensión Ambiental del Análisis Input-Output	75
2.1. Técnica de Análisis Input-Output	75
2.2. Técnica para determinación del efecto multiplicador	78
2.3. Herramientas y bases de datos	80
3. Método Compuesto de las Cuentas Contables	81
3.1. Fuentes de información	81
3.1.1. Normas y estándares de referencia.....	82
3.1.2. Fuentes de información para inventarios.....	82
3.2. Procedimiento de cálculo.....	83
3.2.1. Inventario de usos de suelo.....	84
3.2.2. Inventario de residuos.....	85
3.2.3. Inventario de consumos.....	86
4. Nuevos estándares de normalización (ISO/TS 14067 e ISO/TR 14069).....	89
4.1. Especificación técnica ISO/TS 14067:2013	90
4.2. Informe técnico ISO/TR 14069:2013	92

RESULTADOS: CASOS DE ESTUDIO ¹	95
---	----

CARBON FOOTPRINT USING THE COMPOUND METHOD BASED ON FINANCIAL ACCOUNTS. THE CASE OF THE SCHOOL OF FORESTRY ENGINEERING, TECHNICAL UNIVERSITY OF MADRID	97
ABSTRACT	99
1. INTRODUCTION.....	100
2. HIGHER EDUCATION FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT	102
3. THE SCHOOL OF FORESTRY ENGINEERING	103
4. COMPOUND METHOD BASED ON FINANCIAL ACCOUNTS	104

¹ El capítulo se ha redactado en inglés a fin de aportar los manuscritos que en determinados casos ya han sido publicados por revistas internacionales en revisión por pares.



5. RESULTS	106
5.1. Overall CF	109
5.2. CF according to consumption categories	109
5.3. CF according to accounting categories.....	110
5.4. Offset emissions.....	111
5.5. Normalized results	112
6. DISCUSSION.....	113
6.1. Strengths and weaknesses	114
6.2. Results comparison.....	115
6.3. Scope 3 and system limits	116
7. CONCLUSIONS.....	118
COMPOUND METHOD BASED ON FINANCIAL ACCOUNTS VERSUS PROCESS LIFE CYCLE ANALYSIS IN PRODUCT CARBON FOOTPRINT: A COMPARISON USING WOOD PALLETS	121
ABSTRACT	123
1. INTRODUCTION	124
2. GOAL AND SCOPE	127
3. LIFE CYCLE INVENTORY	130
4. LIFE CYCLE IMPLEMENTATION.....	137
5. LIFE CYCLE INTERPRETATION.....	132
6. CONCLUSIONS	141
CARBON FOOTPRINT USING THE COMPOUND METHOD BASED ON FINANCIAL ACCOUNTS. THE CASE OF OSORIO WIND FARMS	143
ABSTRACT	145
1. INTRODUCTION	146
2. GOAL AND SCOPE.....	150
2.1. Goal definition	150
2.2. Scope definition	152
2.3. Method description	153
2.4. Functional unit	154



3. LIFE-CYCLE INVENTORY	155
4. LIFE-CYCLE IMPLEMENTATION	157
5. LIFE-CYCLE INTERPRETATION	161
6. CONCLUSIONS	164
7. ACKNOWLEDGEMENTS	165
MULTI REGIONAL INPUT-OUTPUT ANALYSIS. EMISSIONS ASSOCIATED WITH THE INTERNATIONAL TRADE AND THE ISOLATION OF ECONOMIES.....	167
ABSTRACT	169
1. INTRODUCTION	170
2. MATERIALS AND METHOD	173
3. RESULTS	176
4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS	187
DISCUSIÓN	191
1. Fortalezas del MC3	193
1.1. Límites del sistema	193
1.2. Análisis Multi-impacto	197
1.3. Enfoque integrado	199
1.4. Internacionalización	203
2. Estrategias para la actualización y coherencia de criterios	204
2.1. Estrategias para el inventario consumos	204
2.1.1. Aspectos generales.....	204
2.1.2. Mejoras en relación al inventario de combustibles	204
2.1.3. Mejoras en relación al inventario de electricidad.....	204
2.1.4. Mejoras en relación al inventario de materiales y servicios	205
2.2. Estrategias en relación al inventario de residuos	210
2.3. Estrategias en relación al inventario de usos de suelo	212
2.4. Estrategias en relación al enfoque híbrido integrado.....	215



CONCLUSIONES.....	217
-------------------	-----

REFERENCIAS	223
-------------------	-----

ANEXOS.....	i
-------------	---

ANEXO I: Fases del Método Compuesto de las Cuentas Contables.....	iii
---	-----

1. Análisis de antecedentes	iv
2. Definición del objetivo y del alcance.....	iv
3. Determinación de límites del sistema.....	iv
4. Análisis de inventarios	iv
5. Análisis de ciclo de vida.....	vi
6. Cálculo de la Huella de Carbono y la Huella Ecológica Corporativa	vi
7. Cálculo de la Huella de Carbono y la Huella Ecológica de Producto.....	vii
8. Interpretación de resultados y evaluación de la incertidumbre	vii
9. Análisis de alternativas y propuestas de mejoras	vii
10. Informe de Huella de Carbono	viii

ANEXO II: Inventario general de consumos de la herramienta del MC3	ix
--	----

ANEXO III: Disco Compacto	xx
---------------------------------	----

AIII.1: Herramienta MC3 versión 2.0

AIII.2: Herramienta Carbonfeel-MC3 versión 12.3

AIII.3: Herramienta Bookfeel.076.0000.BRL.00

AIII.4: Herramienta Bookfeel.724.0000.EUR.00

AIII.5: MC3 versión 2.0 – Forestry Faculty

AIII.6: Carbonfeel-MC3 versión 12.3 – Wood Pallets

AIII.7: Código Matlab[®] – Isolating Economies



LISTA DE FIGURAS



Figura 1.1: Criterios en la elaboración de inventario de emisiones de gases de efecto invernadero.	12
Figura 1.2: Variaciones porcentual según el criterio de elaboración de inventarios de gases de efecto invernadero. Modificado (ECCC 2012)	15
Figura 1.3: Evolución de los inventarios de emisiones de Reino Unido desde el punto de vista del productor, consumidor y regulación Kioto. Modificado (Wiedmann y Barrett 2011).....	16
Figura 1.4. Número de artículos con el tema de “Carbon footprint”, “Ecological footprint”, “Environmental footprint”, “Water footprint” y “Energy footprint” proporcionados por el buscador “Web of Science” a fecha 20 de Enero de 2014.....	20
Figura 1.5: Número de citas por artículo publicado con el tema de “Carbon footprint”, “Ecological footprint”, “Environmental footprint”, “Water footprint y “Energy footprint” proporcionados por el buscador “Web of Science” a fecha 20 de Enero de 2014.....	21
Figura 1.6: Esquema de una tabla origen simplificada.....	37
Figura 1.7: Esquema de una tabla destino simplificada	37
Figura 1.8: Esquema de una tabla Input-Output simplificada.....	38
Figura 1.9: Esquema de una tabla Multi-Región Input-Output con 3 regiones ..	39
Figura 1.10: Número de artículos con el tema de “Carbon footprint”e “Input-Output” proporcionados por el buscador “Web of Science” a fecha 20 de Enero de 2014.	40



Figura 1.11: Número de citas por artículo con el tema de “Carbon footprint” e “Input-Output” proporcionados por el buscador “Web of Science” a fecha 20 de Enero de 2014.	41
Figura 1.12: Número de artículos con el tema de “Carbon footprint” y respectivamente “LCA”, “Input-Output” e “Hybrid”. Datos proporcionados por el buscador “Web of Science” a fecha 20 de Enero de 2014	46
Figura 1.13: Número de citas por artículo con el tema de “Carbon footprint” y respectivamente “LCA”, “Input-Output” e “Hybrid”. Datos proporcionados por el buscador “Web of Science” a fecha 20 de Enero de 2014.	46
Figura 1.14: Detalle gráfico del libro de cálculo Carbonfeel MC3 12.0	57
Figura 1.15: Detalle gráfico del libro de cálculo BookFeel 13.0	58
Figura 1.16: Detalle gráfico de plantilla generada automáticamente por la herramienta Bookfeel 25	59
Figura 3.1: Etapas de un Análisis del Ciclo de Vida (ISO 2006)	72
Figura 3.2: Esquema de cálculo de la Huella de Carbono y la Huella Ecológica a través del inventario de consumos (Blanquer Rodríguez 2012)	87
Figura 3.3: Componentes específicos dentro de los estudios de la HC de producto	91
Figura 3.4: Clasificación de emisiones dentro de los límites operacionales.....	93
Figure 4.1: Structural composition of the carbon footprint of the School of Forestry Engineering according to consumption categories and scope 3 subcategories.	111



Figure 4.2: Structural composition of the carbon footprint of the School of Forestry Engineering according to aggregated accounting categories.....	112
Figure 4.3: Carbon footprint intensities per euros purchased by the School of Forestry Engineering according to MC3 categories.	114
Figure 4.4: Carbon footprint intensities per euros purchased by the School of Forestry Engineering according to aggregated accounting categories.....	114
Figure 4.5: Wood pallet life cycle flow chart for Compound Method based on Financial Accounts and Process Life Cycle Analysis	128
Figure 4.6: Structural composition of the Carbon Footprint according to Compound Method based on Financial Accounts life cycle phases	135
Figure 4.7: Structural composition of the Carbon Footprint according to Compound Method based on Financial Accounts consumption categories.....	136
Figure 4.8: Structural composition of the Carbon Footprint according to Process Life Cycle Analysis life cycle phases	137
Figure 4.9: Location of the Osorio Wind Farms.....	151
Figure 4.10: Osorio Wind Farms life-cycle flow chart	153
Figure 4.11: Structural composition of the carbon footprint according to life-cycle phases.....	158
Figure 4.12: Structural composition of the carbon footprint according to construction life-cycle areas.	159
Figure 4.13: Structural composition of the carbon footprint according to MC3 consumption categories.	160



Figure 4.14: Construction of final demand in reference (left) and closed (right) scenarios.....	175
Figura 5.1: Marco consistente con ISO/TS 14067 e ISO/TR 14069 para la aplicación del enfoque integrado.	200
Figura 5.2: Componentes de inventario obligatorios para la HC de organización y la HC parcial de producto con enfoque integrado siendo consistente con ISO/TS 14067 e ISO/TR 14069.	201
Figura 5.4: Caracterización de las diferentes tipologías de cambio y uso de suelo. Posibles ejemplos relativos a instalación de una planta de bioetanol mediante consumo de maíz	213



LISTA DE TABLAS



Tabla 1.1: Evolución en la concentración y forzamiento radiativo de los gases de efecto invernadero bajo regulación de protocolos internacionales (IPCC 2013)	9
Tabla 1.2: Principales características de las Bases de datos disponibles para la elaboración de Análisis de Ciclo de Vida. Modificado (GHG Protocol 2014).	35
Tabla 1.3: Resumen de las categorías de consumo y columnas presente en la principal hoja de cálculo del MC3 v 2.0	55
Tabla 3.1: Resumen de las características clave de las principales tablas globales Multi-Región Input-Output. UE: Unión Europea. RdM: Resto del Mundo.....	81
Tabla 3.2: Inventario de usos del suelo, herramienta CarbonFeel MC3	84
Tabla 3.3: Inventario de residuos, herramienta Carbonfeel MC3. RSU: Residuo Sólido Urbano; EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales.	86
Tabla 3.4: Clasificación de las emisiones y absorciones de Gases de efecto invernadero según ISO/TR 14069.	94
Table 4.1: Carbon footprint of the Forestry Engineering School (tCO ₂ e) by consumption categories and subcategories.	108
Table 4.2: Inputs and GHG emissions (tCO ₂ e) by consumption categories for the Compound Method based on Financial Accounts	132
Table 4.3: New inputs and GHG emissions (tCO ₂ e) for process life cycle analysis	134



Table 4.4: Emissions (kgCO ₂ e/unit) from cradle-to-gate life cycle analysis of wood pallets	138
Table 4.5: Carbon footprint (tCO ₂ e) of the Osorio Wind Farms by consumption categories and life-cycle phases.	158
Table 4.6: Global emissions embodied in final demand imports.	179
Table 4.7: Annex 1 emissions embodied in final demand imports. Change by countries	179
Table 4.8: Non-Annex 1 emissions embodied in final demand imports. Change by countries	180
Table 4.9: Global emissions embodied in final demand imports. Change by sectors.....	182
Table 4.10: Annex 1 emissions embodied in final demand imports. Change by sectors.....	182
Table 4.11: Non-Annex 1 emissions embodied in final demand imports. Change by sectors.....	184
Tabla All.1: Inventario general de consumos de la herramienta del MC3.	x

INTRODUCCIÓN



1. Cambio Global y Desarrollo Sostenible

La idea de que nos encontramos en un momento clave de lo que se viene denominando Cambio Global y Desarrollo Sostenible se afianza cada vez más en la sociedad. El estudio de estos dos paradigmas surgidos en el seno de la Ecología va trascendiendo no solo al resto de los ámbitos de la ciencia, sino también a la percepción directa de los ciudadanos, indistintamente de su condición cultural, social y económica.

1.1. Cambio Global

La Tierra no es la primera vez que se enfrenta a un fenómeno de cambio ambiental global. Por ejemplo, el cambio de la composición de la atmósfera con la incorporación del oxígeno, impuso la desaparición de las formas de vida primitivas de tipo anaerobio (Lovelock 1985). Ahora es un cambio de origen humano y es la velocidad de los acontecimientos lo que le confiere una nueva dimensión nunca antes descrita en los ámbitos de la biología, climatología y geología.

1.1.1. Evidencias Cambio Global

La valoración del impacto del ser humano sobre el planeta Tierra sobre pasa lo relativo al calentamiento global. Sus repercusiones en los procesos que determinan el funcionamiento del sistema Tierra hacen que la valoración deba hacerse mediante el término *cambio global*. La interacción entre los propios sistemas biofísicos y entre éstos y los sistemas sociales, para amplificar o atenuar sus efectos, es una característica esencial del cambio global que dificulta la predicción de su evolución.



Durante el último siglo XX, la población mundial se ha multiplicado por cuatro y con ella la generación de residuos ha crecido a un ritmo superior a la capacidad natural de la Tierra para absorberlos (Wackernagel et al. 2002). Entre estos residuos, los gases de efecto invernadero (GEI) han alcanzado niveles inéditos en los últimos 800.000 años, según se desprende del análisis de las muestras de hielo obtenidas en Groenlandia procedentes del Pleistoceno Medio (Lüthi et al. 2008; Fischer et al. 2010; Barker et al. 2011). Más en concreto, la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO_2) se ha incrementado en un 40%, desde 278 ± 5 ppm en 1750 a $390,5 \pm 0,1$ ppm en 2011 (Ballantyne et al. 2012). En ese mismo periodo, la concentración de metano (CH_4) se ha incrementado en un 150%, desde 722 ppb a 1803 ppb (Dlugokencky et al. 2011). Y también en el mismo periodo, la concentración de óxido nitroso (N_2O) se ha incrementado un 20%, desde 271 ppb a 324,2 ppb (Prather et al. 2012).

De acuerdo con los documentos preliminares del 5º informe evaluación elaborados por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, acrónimo en inglés) (IPCC 2013a) estamos ante dos importantes evidencias: (1) el calentamiento del sistema climático es inequívoco y desde la década de los 50 muchos de los cambios climáticos observados no tienen precedentes en milenios; y (2) la influencia humana en el sistema climático es clara y está provocada por el aumento en las concentraciones de GEI. En resumen, las emisiones de CO_2 equivalente (CO_2e) se acumulan en la atmósfera causando el calentamiento del sistema climático y una posible retroalimentación negativa en la salud de los ecosistemas (Butchart et al. 2010).



Las dimensiones del agotamiento y sobreexplotación del planeta pueden leerse desde múltiples perspectivas. La pérdida de biodiversidad es, junto con el cambio climático, una de las principales crisis ambientales. Desde la era industrial, la acción humana sobre los ecosistemas ha generado un aumento en el ratio de extinción de especies superior en 100 y hasta 1.000 veces a la tasa natural esperable (Hanski 2005; IPCC 2007a). Estas bruscas extinciones de especies, junto con la pérdida de biodiversidad que conllevan, podrían ser tan devastadoras para la Tierra como el cambio climático en sí y la contaminación atmosférica (Cardinale et al. 2012).

Además de los alarmantes descensos en biodiversidad, es necesario señalar la considerable reducción en la superficie biológicamente productiva de la Tierra. En tan solo los 10 años de la década de 2000 se destruyeron 128 millones de hectáreas de bosques tropicales y la extracción mundial de materias primas aumentó un 45%, alcanzando valores que según la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) deberían alarmarnos sobre su agotamiento (FAO 2010). Actualmente el 85% de las explotaciones pesqueras marinas están sobre-explotadas o agotadas (WWF et al. 2012) y el 25% de la superficie terrestre esta desertificada (IFAD 2010).

La intensidad, frecuencia y duración de los fenómenos meteorológicos extremos ha sido estudiada con especial atención por el IPCC. Así, según el Informe Especial sobre Eventos Extremos y Desastres (IPCC 2012) es muy probable (90-100% de confianza) que el número de días fríos haya disminuido y el número de días cálidos haya aumentado a escala mundial desde 1950. En relación con episodios de precipitación intensa, es probable (66-100% de confianza) que se hayan incrementado



durante el último milenio y que la frecuencia, intensidad y duración de las sequías haya aumentado en muchas regiones.

Los avances científicos realizados en los campos de la medicina, ciencia y tecnología en lo acontecido del siglo XXI (por ejemplo: secuenciación del ADN humano, confirmación del agua en Marte, descubrimiento del Grafeno, avances de la nanotecnología, etc.) se presentan como fenómenos derivados de la globalización. Sin embargo, otros hechos sociales y culturales también ligados a la globalización hacen que haya que revisar con cuidado el balance de los beneficios netos de esos relevantes avances y por ende de la globalización en sí misma. Diversos estudios han valorado la correlación existente entre globalización e inequidad de ingresos entre personas (índices NOK y GINI, respectivamente –Dreher 2006; World Bank 2009–). Estos trabajos han mostrado que la globalización conduce a un crecimiento de la desigualdad social (por ejemplo, –Atif et al. 2012–). La cifra de 1,4 mil millones de personas, 20% de la población mundial, viviendo con menos de 1,25 US\$ al día contrasta de manera alarmante con los 34,80 US\$ de media per cápita mundial (World Bank 2013).

La preocupación generalizada sobre el cambio global ha conducido al desarrollo de diversas cumbres mundiales con el objetivo de afrontar lo que se ha denominado el Desarrollo Sostenible (Cumbres de la Tierra 1992, 2002 y 2012). En estos encuentros se han lanzado voces de alarma, así como propuesto algunas acciones con el fin de mitigar los aspectos negativos del cambio global y lograr modelos de desarrollo más sostenibles. Los avances han sido relevantes, pero las evidencias demuestran que no suficientes. Sirva como reflexión las ausencias de tres de los más importantes líderes



mundiales en la última Cumbre de la Tierra de 2012 celebrada en Rio de Janeiro – Brasil– (Barak Obama de Estados Unidos, Angela Merkel de Alemania y David Cameron del Reino Unido).

1.1.2. Gases de efecto invernadero

Los GEI se caracterizan por su capacidad de absorber y reemitir radiación en longitudes de onda específicas dentro del espectro de la radiación terrestre. Este fenómeno natural incrementa la temperatura de la superficie terrestre en 33°C, generando condiciones que facilitan la vida en superficie.

La clasificación más común de GEI se realiza en función de su origen. En este sentido se clasifican como naturales: vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) y ozono (O_3); y antropogénicos: perfluorocarbonados (PFC), hexafluoruros de azufre (SF_6) y halocarbonos, que pueden contener otras sustancias como el cloro, bromo, flúor e hidrógeno.

La Tabla 1.1 presenta las concentraciones tanto actuales como pre-industriales junto con el forzamiento radiativo. Se entiende como forzamiento radiativo el incremento en el balance energético del sistema de la Tierra, medido en vatios por metro cuadrado ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) y en respuesta a alguna perturbación externa, en este caso un gas distribuido en la atmósfera. La suma de forzamientos radiativos generados por CO_2 , N_2O , CH_4 corresponde con el 97% del total, quedando justificada su importancia respecto la influencia climática actual. Sin embargo, el tiempo de permanencia de estos gases en la atmósfera es muy inferior al resto de gases con origen antropogénico mencionados en la Tabla 1.1. Es importante señalar el horizonte temporal de estas



evaluaciones, por lo general 100 años. Estas evaluaciones se están realizando de una manera continua; sirva como ejemplo el reciente acuerdo en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés), en donde se incorpora el trifluoruro de nitrógeno (NF₃) como GEI a ser controlado dentro de los inventarios nacionales de GEI (Rivers 2012).



Capítulo 1. Introducción

Tabla 1.1: Evolución en la concentración y forzamiento radiativo de los gases de efecto invernadero bajo regulación de protocolos internacionales. Modificado (IPCC 2013)

Compuesto		Concentración en atmósfera			Forzamiento radiativo ($W \cdot m^{-2}$)	Acuerdo que regula su emisión
Formula	Nombre	1750	2011	Unidades		
CO ₂	Dióxido de Carbono	278±2	391,0±0,2	ppm	1,82±0,19	Protocolo de Kioto
CH ₄	Metano	722±24	1803±2	ppb	0,48±0,05	Protocolo de Kioto
N ₂ O	Óxido Nitroso	270±7	324,0±0,1	ppb	0,17±0,03	Protocolo de Kioto
HFC	hidrofluorocarbono	0	255,6±0,4	ppt	0,020	Protocolo de Kioto (una clase de compuestos: HFC-32, HFC-134a, ...)
PFC	perfluorocarbono	40	83,16±0,12	ppt	0,005	Protocolo de Kioto (determinados compuestos: CF ₄ , C ₂ F ₆ , ...)
SF ₆	hexafluoruro de azufre	0	7,28±0,03	ppt	0,004	Protocolo de Kioto
CFC	clorofluorocarbono	0	851,37±1,9	ppt	0,026	Protocolo de Montreal (determinados CFC13, CF ₂ Cl ₂ , ...)
HCFC	hidroclorofluorocarbono	0	255,60±0,05	ppt	0,005	Protocolo de Montreal (determinados compuestos: HCFC-22, HCFC-141b, ...)
CCl ₄	tetracloruro de carbono	0	85,8±0,8	ppt	0,015	Protocolo de Montreal
CH ₃ CCl ₃	Metilclorofor mo	0	6,32±0,07	ppt	<0,001	Protocolo de Montreal
SO ₂ F ₂	Fluoruro de sulfurilo	0	1,71	ppt	<0,001	Ninguno
NF ₃	Trifloruro de Nitrógeno	0	0,60	ppt	<0,001	Protocolo de Kioto



1.1.3. Acuerdos internacionales

Los principales acuerdos internacionales en materia de control de emisiones de GEI son el Protocolo de Montreal (PNUMA 2006) y el Protocolo de Kioto (United Nations 1998). El Protocolo de Montreal es el tratado internacional diseñado para proteger la capa de ozono reduciendo la producción y el consumo de numerosas sustancias que reaccionan con el ozono. El acuerdo fue negociado en 1987 y entró en vigor en enero de 1989. Su implementación se considera un éxito dado el retroceso del agujero en la capa de ozono (Son et al. 2008). Por otro lado, el Protocolo de Kioto es el tratado internacional diseñado para reducir las emisiones de GEI. Su aprobación se desarrolló en la Tercera Conferencia de las Partes de la UNFCCC del año 1997. Sin embargo, no entra en vigor hasta 2005 tras la ratificación por parte de Rusia pero sin la presencia de importantes economías mundiales como Estados Unidos y China. En él se establece la meta de reducir en un 5% las emisiones de GEI antropogénicas de los países desarrollados, respecto a los niveles de 1990 para el periodo de compromiso 2008 – 2012.

Los esfuerzos realizados desde la firma de los acuerdos internacionales han permitido desarrollar importantes avances en cuanto a la regulación (por ejemplo, Comercio Europeo de Derechos de Emisión). Sin embargo, a medida que se alcanzan importantes éxitos como la sustitución de los CFC y los HCFC –eliminadas por el citado Protocolo de Montreal–, también hay retrocesos y nuevas amenazas. En este sentido cabe señalar la falta de control de emisiones en países con escasa o nula regulación ambiental, algo ya denunciado por numerosos trabajos (por ejemplo, Velders et al. 2009) que alertan sobre el esperable crecimiento de las emisiones de GEI si continúa



la ausencia de controles sobre la producción global.

Los inventarios de GEI son una herramienta fundamental para el control de las emisiones. En este sentido, el IPCC ha elaborado diferentes directrices para la elaboración de los mismos (IPCC 2006, 1996). Estos inventarios deben ser obligatoriamente elaborados por los países incluidos en el Anexo 1 del Protocolo de Kioto. Estas comunicaciones son objeto de exámenes cuidadosos por equipos de expertos independientes, y son claves para determinar el porcentaje de cumplimiento de los países sobre los compromisos de reducción adquiridos por éstos.

Sin embargo, los criterios para la elaboración de inventarios de GEI no son únicos. Un hecho trascendental, que influye en la capacidad de desarrollar todas las estrategias a nuestro alcance, es la falta de regulación sobre las emisiones desde el punto de vista del consumidor (en adelante, inventario basado en el consumidor). En la actualidad, los inventarios de GEI son elaborados únicamente atendiendo las directrices del IPCC por lo que se basan en la producción territorial sin valorar la influencia de los bienes y servicios que son adquiridos o vendidos dentro del comercio internacional. Dada la evidente ausencia de una efectiva regulación ambiental global, y de las bajas perspectivas para lograrlo en un breve horizonte temporal, la consideración de inventarios basados en el consumidor supone una propuesta muy relevante para impulsar todas las estrategias a nuestro alcance (Wiedmann y Barrett 2013).

1.1.4. Criterios en la elaboración de inventarios

Los inventarios de emisiones de GEI pueden ser elaborados de distintas maneras. Las diferencias en los criterios de asignación pueden dar preferencia a diferentes estrategias de mitigación. Generalmente se consideran tres posibles criterios de asignación para la elaboración de inventarios de GEI: (1) basado en el territorio, (2) basado en el productor y (3) basado en el consumidor (Figura 1.1)

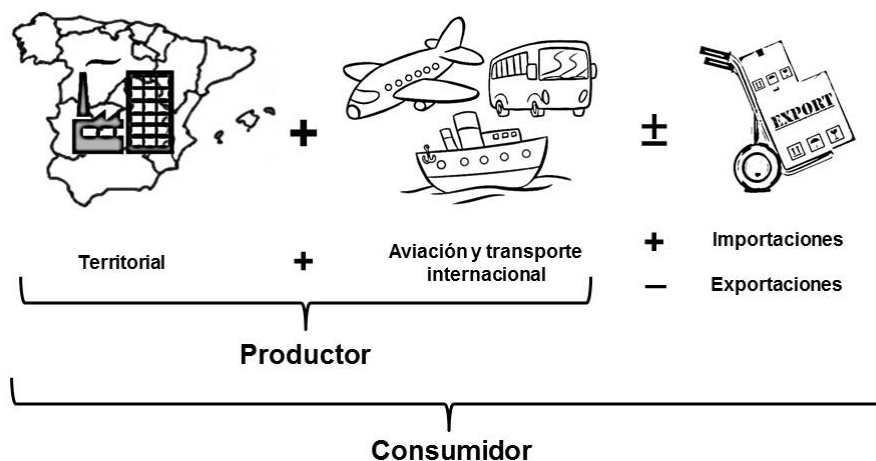


Figura 1.1: Criterios en la elaboración de inventario de emisiones de gases de efecto invernadero.

Los inventarios de GEI basados en el territorio son elaborados en el marco de la UNFCCC. La UNFCCC se basa en las directrices del IPCC (2006) para la elaboración de inventarios, "los inventarios nacionales incluyen las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero que se producen dentro del territorio nacional". De acuerdo con esta definición, las emisiones de GEI emitidas por la aviación y transporte internacional no se asignan a los distintos países (ECCC 2012).



El criterio basado en el productor consiste en la asignación de emisiones de GEI de una manera consistente con los límites del sistema de actividades económicas –es decir, utilizando el Sistema de Cuentas Nacionales–. Estos inventarios incluyen la aviación y el transporte marítimo internacional y suelen asignarse a los países en función del operador. Actualmente son elaborados oficialmente por agencias internacionales, como Eurostat en la Unión Europea, a través de las denominadas Matrices de Contabilidad Nacional.

Por último, el criterio basado en el consumidor consiste en asignar las emisiones a los consumidores en cada país. Conceptualmente, el inventario de GEI basados en el consumidor puede ser considerado como la suma del inventario de GEI basado en el productor menos las emisiones de GEI asociadas a la exportaciones, más las emisiones de GEI asociadas a las importaciones. Pese a las evidencias sobre la importancia de elaborar inventarios basados en el consumidor, todavía ningún gobierno realiza estos informes de manera oficial (ECCC 2012). Esta circunstancia debe considerarse grave dada la importancia de las emisiones asociadas al comercio internacional de bienes y servicios. Los valores estimados para el año 2004, representan un total de 5 GtCO₂e –aproximadamente el 25% de las emisiones globales– (Peters y Hertwich 2006).

Las emisiones GEI asociadas al comercio internacional son de enorme relevancia (ver revisiones de Wiedmann 2009, Wiedmann et al. 2007). Además de por su importante magnitud, cabe señalar dos motivos relevantes. En primer lugar, el intercambio de bienes y servicios a escala mundial ha experimentado notables tasas de crecimiento positivas en los últimos 50 años. Si bien la economía mundial casi se cuadruplicó desde 1960, el comercio mundial se multiplica por un factor de 12



(UNEP/IISD 2005). En segundo lugar, el Protocolo de Kioto avanza tras el cierre del primer periodo de compromiso con la participación de un conjunto de países que apenas representan el 15% de las emisiones mundiales. Países tan importantes en el contexto mundial como Rusia, Japón, Canadá y Sudáfrica confirmaron en 2012 su intención de abandonar este tratado bajo los actuales esquemas de negociación.

Las diferencias en función del criterio de elaboración de inventarios ofrecen importantes reflexiones que influyen en la búsqueda de acuerdos internacionales. Los trabajos publicados gracias al desarrollo de los modelos Multi-Región Input-Output (en adelante, MRIO), muestran que con las actuales propuestas de elaboración de inventarios hay países beneficiados y otros perjudicados (Aichele y Felbermayr 2011; Hertwich y Peters, 2009). En la Figura 1.2 se muestra las variaciones existentes en función del criterio de elaboración de inventarios de GEI (productor vs consumidor) y se puede observar que Rusia, Canadá y Sudáfrica son algunos de los países perjudicados con los criterios apoyados desde UNFCCC. Nótese la coincidencia con los países previamente mencionados por abandonar el tratado del Protocolo Kioto.

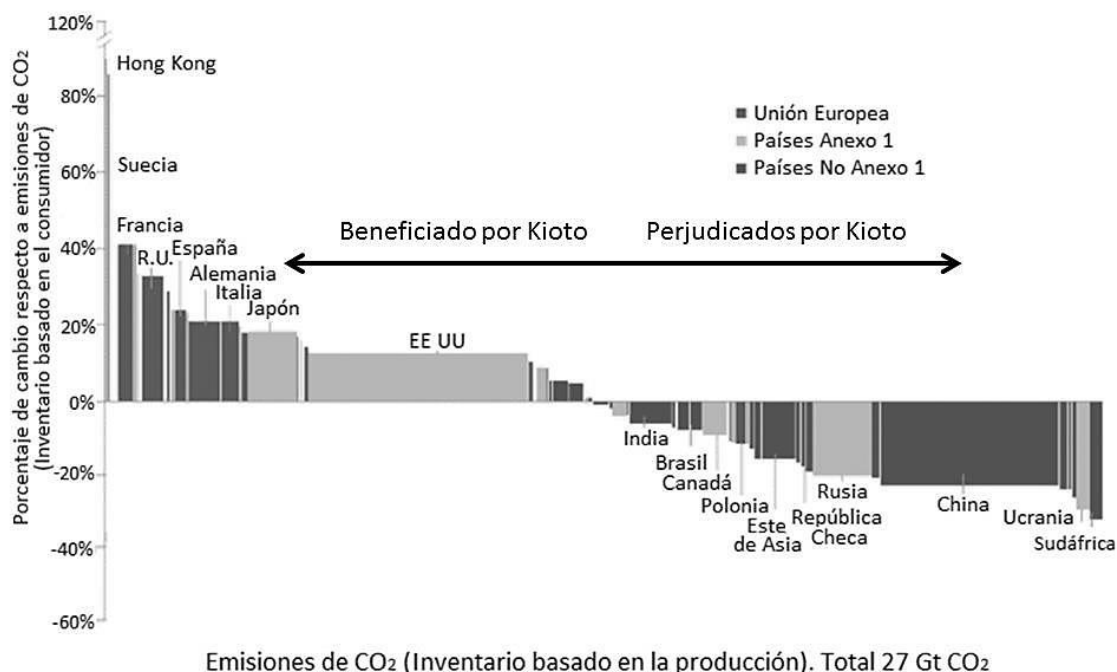


Figura 1.2: Variaciones porcentual según el criterio de elaboración de inventarios de gases de efecto invernadero. Modificado (ECCC 2012)

Reino Unido es el país sobre el que más estudios se han realizado en relación con la elaboración de inventarios basados en el consumidor. Sus emisiones basadas en la producción se han reducido en un 25,2% entre 1990 y 2010, duplicando la reducción del 12,5% requerida en virtud del Protocolo de Kioto. Sin embargo, atendiendo al criterio de elaboración de inventarios, desde el punto de vista del consumidor (es decir, valorando la importación y exportación de bienes y servicios) sus emisiones de 1990 al 2010 aumentaron en un 20,1%. Véase la Figura 1.3 en donde se observan los inventarios de GEI elaborados desde el punto de vista territorial, productor y consumidor. Para más detalle sobre las repercusiones y estrategias políticas en Reino Unido puede consultarse diferentes trabajos (Bowen y Rydge 2011; Wiedmann y Barrett 2013, 2011; Wiedmann et al. 2010).

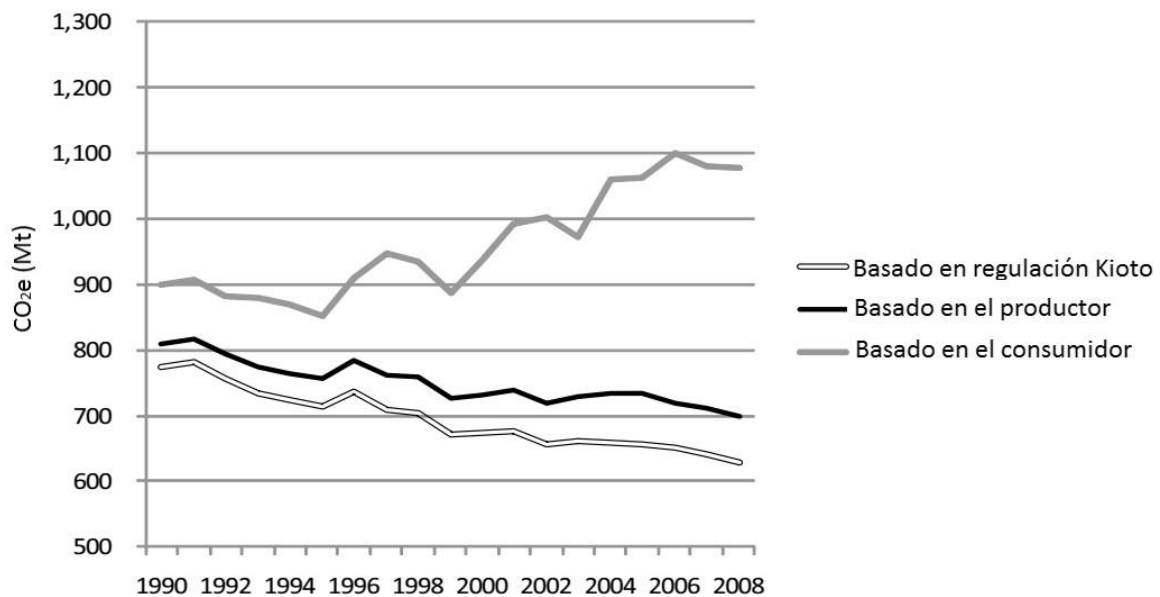


Figura 1.3: Evolución de los inventarios de gases de efecto invernadero de Reino Unido desde el punto de vista del productor, consumidor y regulación Kioto. Modificado (Wiedmann y Barrett 2011)

1.2. Desarrollo Sostenible

El sencillo hecho de que el planeta Tierra posea unos límites concretos conlleva implícitamente la consecuencia de que posea unos recursos limitados. Esta evidencia hace que sea necesario plantearse un aprovechamiento sostenible de los recursos que garantice el conveniente desarrollo de las necesidades humanas con el mantenimiento y preservación de los recursos que lo hacen posible.

1.2.1. Evolución del concepto Desarrollo Sostenible

Hace ya más de cuarenta años el informe “Los límites del crecimiento” elaborado por el Club de Roma y presentado en la Conferencia de Estocolmo (Meadows et al.



1972) desató numerosos debates en todo el mundo con respecto al futuro del planeta. De acuerdo con las predicciones recogidas en el informe, la escasez de recursos y el deterioro ambiental provocarían, tarde o temprano, el colapso del planeta de no conseguir la detención voluntaria del crecimiento económico y demográfico.

Entre los trabajos suscitados a raíz del reconocido Informe Meadows, cabe destacar el Informe Brundtland (Brundtland 1987). Este trabajo supuso un punto de inflexión en el análisis de las relaciones entre los problemas medioambientales, sociales y el modelo de crecimiento. En dicho informe se define por primera vez el Desarrollo Sostenible como aquel desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras. Esta aceptación ilustra la creciente toma de conciencia de la fragilidad inherente de los ecosistemas del planeta.

Aunque, desde entonces el término de Desarrollo Sostenible ha sido ampliamente utilizado, todavía son varias las imprecisiones que hay alrededor del término y son numerosas las concepciones que siguen surgiendo (Carballo 2009). De una manera generalizada existen, cuando menos, dos paradigmas diferentes. El primer paradigma acuña el concepto de economía ambiental y se formula desde la racionalidad de aplicar la teoría económica tradicional a los problemas ecológicos; es decir, incorporar variables ambientales a los modelos económicos sin salirse del universo monetario (Cropper y Oates 1992). El segundo paradigma acuña el término de economía ecológica y opta por un enfoque multidisciplinar, concibiendo el sistema económico como parte de la biosfera (Martinez-Alier et al. 1998). En la actualidad existen críticas al concepto de Desarrollo Sostenible que plantean nuevos paradigmas diferentes a los expuestos.



Algunos ejemplos son las propuestas de decrecimiento (Kallis et al. 2010) y la denominada economía del estado estacionario (O'Neill et al. 2010). De igual manera, el término sostenibilidad está siendo enfocado desde diferentes ámbitos disciplinares y profesionales (IJAEC 2014; ISSP 2014; ISDRS 2014). En este sentido la asociación científica con mayor número de conferencias, es la Sociedad Internacional para la Investigación del Desarrollo Sostenible, cuya reciente conferencia número 20 se desarrolló en Trondheim (Noruega), entre el 18 y 20 Junio de 2014.

1.2.2. Indicadores para el Desarrollo Sostenible

Los indicadores de Desarrollo Sostenible son aquellos que evalúan variables relacionadas con el bienestar económico, social y ambiental (Quiroga 2007). Desde el momento en que se asume que es necesario realizar cambios en el modelo de desarrollo, surge la necesidad de elaborar herramientas que permitan valorar si los cambios propuestos tienen los efectos esperados y en qué medida son alcanzados los mismos.

Los indicadores de Desarrollo Sostenible relacionados con el medio ambiente se denominan indicadores ambientales e indicadores de sostenibilidad ambiental. La diferenciación entre ambos radica en la consideración de los límites naturales. La primera generación de indicadores ambientales fue establecida en la década de los 80. Desde entonces se han sucedido los debates sobre la incorporación de los límites naturales a fin de alcanzar indicadores de sostenibilidad ambiental (Quiroga 2007). El esfuerzo en torno a la producción de súper índices o mega indicadores agregados ha



sido también notorio, resaltando por su importancia los denominados la *Huella Ecológica* (Wackernagel y Rees 1996), el *Índice del Planeta Vivo* (WWF 2004) y el *Índice de Sostenibilidad Ambiental* (YCELP/CIESIN 2005).

El concepto de Huella se origina con el desarrollo del indicador de la Huella Ecológica. La principal aportación de este indicador, presentado a la comunidad científica en la década de los 90, es la consideración de los límites naturales. Desde entonces, han sido muchos los indicadores desarrollados que parten de la misma base conceptual de análisis. Véanse los ejemplos de la Huella Energética (Wackernagel y Rees 1996), la Huella Hídrica (Hoekstra y Hung 2002), la Huella de Emergía (Zhao et al. 2005), la Huella de Exergía (Chen y Chen 2007), la Huella de Carbono (Wiedmann y Minx 2008), la Huella de la Biodiversidad (Yaap et al. 2010), la Huella Química (Panko y Hitchcock 2011), la Huella de Fósforo (Wang et al. 2011) y la Huella de Nitrógeno (Leach et al. 2012).

En la actualidad, los indicadores tipo Huella se han convertido en indicadores comunes para investigadores, consultores y responsables de políticas. Las aplicaciones e implicaciones en lo relacionado con la sostenibilidad y el bienestar humano han sido investigadas desde diferentes perspectivas profesionales, predominando la de químicos, biólogos, ingenieros y economistas.

1.2.3. Principales indicadores tipo Huella

La Figura 1.4 muestra la evolución del número de trabajos publicados relacionados con los principales indicadores tipo Huella (en inglés, “*Carbon footprint*”, “*Ecological footprint*”, “*Environmental footprint*”, “*Water footprint*” y “*Energy footprint*”) a



lo largo de los últimos 17 años. Un total de 4.520 artículos publicados, frente a los que otras tipologías tipo Huella (en inglés, “*Land footprint*”, “*Emission footprint*”, “*Chemical footprint*”, “*Nitrogen footprint*”, “*Social footprint*”, “*Economic footprint*”, “*Exergy footprint*”, “*Biodiversity footprint*”, “*Waste footprint*”, “*Cultural footprint*”, “*Phosphorous footprint*” y “*Emergy footprint*”) han generado, cuya suma total es 125 artículos publicados (Web of Science 2014).

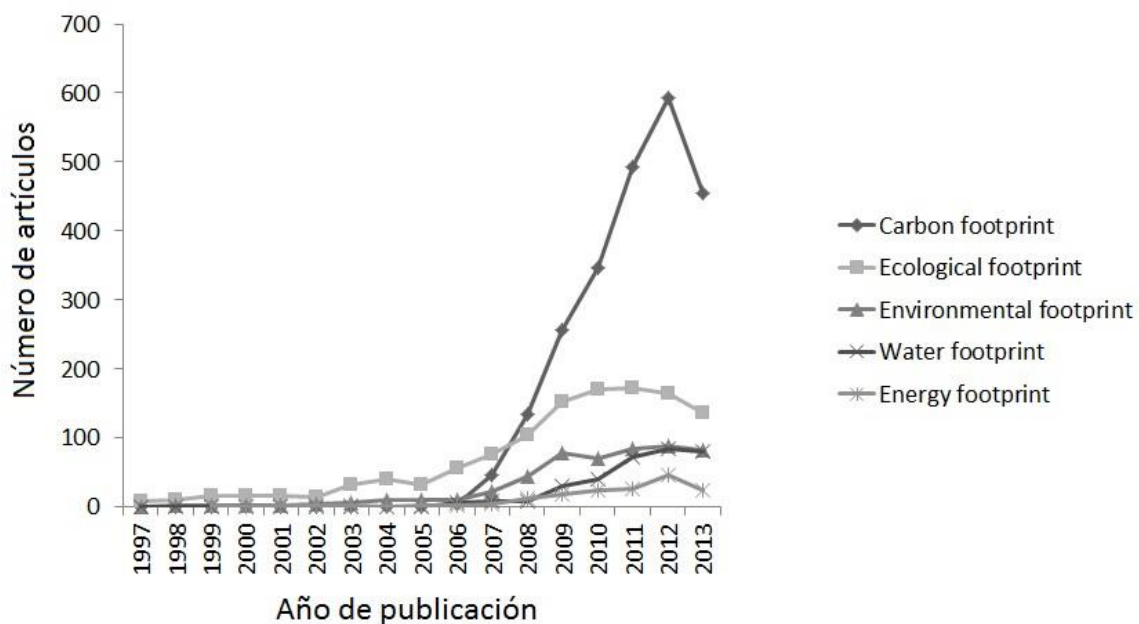


Figura 1.4. Número de artículos con el tema de “*Carbon footprint*”, “*Ecological footprint*”, “*Environmental footprint*”, “*Water footprint*” y “*Energy footprint*” proporcionados por el buscador “*Web of Science*” a fecha 20 de Enero de 2014.

Tal y como se puede observar en la Figura 1.4, el concepto de la Huella de Carbono (HC) se significa como un pilar en relación al resto de indicadores. A continuación se muestra el número de citas por artículo publicado (Figura 1.5). Esta relación permite generar una idea más aproximada sobre la relevancia científica del tema abordado. Pese al descenso en el número de artículos publicados en el año 2013,

las citas en relación a los artículos sobre la HC muestran una significativa progresión geométrica en los últimos 7 años. Es más, el conjunto de indicadores tipo Huella presenta valores exponencialmente ascendentes desde el año 2009.

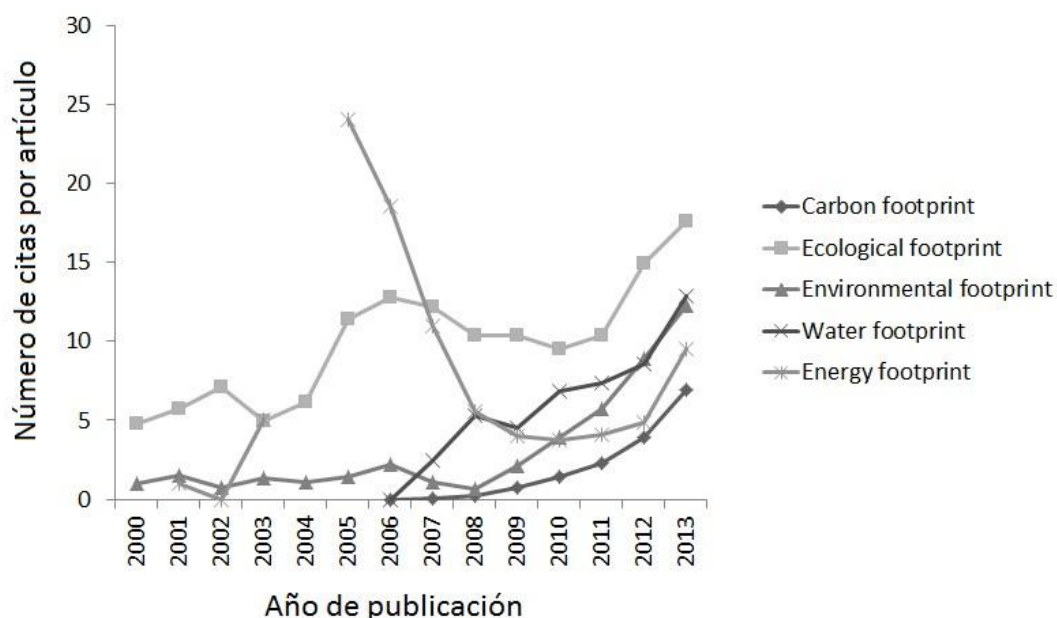


Figura 1.5: Número de citas por artículo publicado con el tema de “*Carbon footprint*”, “*Ecological footprint*”, “*Environmental footprint*”, “*Water footprint*” y “*Energy footprint*” proporcionados por el buscador “*Web of Science*” a fecha 20 de Enero de 2014.

Dada la importancia de los indicadores antes mencionados, se presenta a continuación una breve descripción de los mismos: la Huella Ecológica, la Huella Ambiental, la Huella Energética, la Huella Hídrica y la HC.

La Huella Ecológica (en inglés, “*Ecological Footprint*”) se define como una medida de la tierra y agua biológicamente productivas requerida por un individuo, población o actividad para producir todos los recursos consumidos y absorber los desechos generados utilizando las tecnologías y prácticas de gestión predominantes (Wackernagel y Rees 1996). Las áreas biológicamente productivas



incluyen tierras de cultivo, pastos, bosques y áreas de pesca. Sin embargo, no incluyen desiertos, glaciares y el mar abierto (Schneider y Samaniego 2009). La unidad de medida de la Huella Ecológica es la hectárea global, de forma que esta unidad asocia la productividad promedio de las superficies de tierra y mar biológicamente productivas. El uso de una unidad común, permite que diferentes tipos de terreno sean comparados. Con este fin se conciben y emplean los factores de equivalencia y rendimiento. Estos factores permiten la conversión de hectáreas físicas de diferentes áreas y tipos de terreno, en hectáreas globales. Los avances en la estandarización y metodología de cálculo se desarrollan desde la organización no gubernamental “*Global Footprint Network*” (www.footprintnetwork.org) liderada por el fundador del concepto Mathis Wackernagel. Actualmente es el método más ampliamente utilizado para la elaboración de evaluaciones nacionales (Wackernagel et al. 1999; Monfreda et al. 2004). Estos análisis han sido aplicados a más de 200 países y son un elemento esencial del conocido informe *Planeta Vivo* (WWF et al. 2012). A pesar de sus bondades e implantación internacional, la Huella Ecológica recibe diferentes críticas en lo relacionado con la dificultad de valorar procesos de producción intensiva y con la denominada biocapacidad del planeta (Fiala 2008; van den Bergh y Grazi 2014).

La Huella Ambiental (en inglés, “*Environmental Footprint*”) mide el desempeño ambiental a lo largo del ciclo de vida de una organización o producto (European Commission 2013a). Téngase en cuenta que la ISO 14040 define el término *producto* en tanto *bienes* (por ejemplo, los bienes de consumo, bienes intermedios) como *servicios* (por ejemplo servicios complejos, como eventos, conferencias y exposiciones). El cálculo de la Huella Ambiental se realiza evaluando 14 posibles



categorías de impacto: (1) cambio climático; (2) agotamiento de la capa de ozono; (3) toxicidad humana y efectos cancerígenos; (4) toxicidad humana y efectos no cancerígenos; (5) material particulado y respiración de compuestos inorgánicos; (6) radiaciones ionizantes; (7) formación fotoquímica de ozono; (8) acidificación; (9) eutrofización terrestre; (10) eutrofización acuática; (11) ecotoxicidad de agua dulce; (12) uso del suelo; (13) agotamiento de recursos hídricos; y (14) agotamiento de recursos minerales y combustibles fósiles. La Unión Europea, a través de sus centros de investigación conjunta, es la institución internacional que está liderando el desarrollo metodológico para la evaluación de la Huella Ambiental. El principal interés que ha llevado a impulsar de manera estratégica este indicador es el de crear un mercado único para productos verdes. Con este fin se han puesto en marcha un conjunto de acciones para la estandarización de los métodos de cálculo de la Huella Ambiental desde la perspectiva de un producto y desde la perspectiva de una organización. Las guías publicadas por la Unión Europea (European Commission 2013a) se han desarrollado sobre la base de métodos bien establecidos, probados y ampliamente utilizados, así como normas y directrices existentes (JRC-IES 2010). Uno de los retos asumidos en dichas guías ha sido elaborar métodos que permitan la comparabilidad entre resultados. Sin embargo, los esfuerzos realizados se están cuestionando por el escaso número de proyectos pilotos puestos en marcha. En esta fase inicial, tan solo se están valorando 10 proyectos de un único sector; el sector “agroalimentario, envases y servicios de catering europeo”.

La Huella Hídrica (o del Agua), en inglés “*Water Footprint*”, da cuenta de la proporción del uso del agua en relación a la actividad desarrollada. El concepto, ideado en 2002 por Arjen Hoekstra, considera el consumo total de agua, las



características del clima y la eficiencia al utilizar este recurso (Hoekstra y Hung 2002). La Huella Hídrica es análoga a la Huella Ecológica; pero mientras que ésta última calcula el área total de espacio productivo requerido, la Huella Hídrica calcula el volumen de agua necesario para producir los mismos bienes y servicios. A escala mundial, la Huella Hídrica representa tan solo el 16% de la capacidad natural del planeta. Este porcentaje varía enormemente dentro de un mismo país (WWF et al. 2012). La escasez de recursos hídricos tiene una componente especialmente relevante en la distribución de los mismos. Los últimos avances metodológicos consideran la Huella Hídrica como un conjunto de tres tipos de uso del agua. Estos son los conocidos como la Huella Hídrica azul, verde y gris (Chapagain y Hoekstra 2011). La Huella Hídrica verde es el volumen de aguas pluviales almacenado en el suelo que se evapora de los campos de cultivos. La Huella Hídrica azul es el volumen de agua dulce extraído de los cuerpos de agua, que es utilizado y no devuelto. Esta Huella está representada principalmente por la evaporación del agua de regadío de los campos de cultivo. La Huella Hídrica gris es el volumen de agua contaminada como resultado de los procesos de producción. Se calcula como el volumen de agua requerido para diluir los contaminantes a tal concentración que la calidad del agua alcance estándares aceptables. Recientemente ha sido publicado el segundo borrador del estándar internacional ISO/DIS 14046.2 *“Environmental management -- Water footprint -- Principles, requirements and guidelines”*, pero no parece que haya muchas expectativas de que pueda ser aprobado, por la falta de alineación con las metodologías elaboradas por la organización internacional de la Huella Hídrica *“Water Footprint Network”*.

La propuesta de la Huella Energética (o de Energía), en inglés *“Energy*



Footprint”, fue desarrollada inicialmente por Jiun-Jiun Ferng (2002) como un análisis independiente dentro del cálculo de la Huella Ecológica. De acuerdo con la concepción de la Huella Ecológica, las emisiones de CO₂ procedentes de la combustión de combustibles fósiles y de la generación de electricidad son transformadas en superficie forestal, considerando los valores promedios mundiales de secuestro de carbono por sistemas forestales. Esta relación –energía, emisiones, superficie– ha sido criticada por la alta variabilidad presente en las diferentes tecnologías y ecosistemas (van den Bergh y Verbruggen 1999). Ello, unido a que esta componente energética de la Huella Ecológica es la que representa la proporción más crítica del total de la Huella Ecológica (Kitzes y Wackernagel 2009), ha motivado el interés del estudio de la Huella Energética de forma específica. Recientemente, algunos investigadores abogan por una redefinición de la Huella Energética como la suma de superficies destinadas a consumos no alimentarios y realizar su análisis en función de componentes energéticas –nuclear, renovable y fósil– (Klemeš et al. 2012).

2. Huella de Carbono

Los objetivos hacia la búsqueda de un Desarrollo Sostenible son compartidos por prácticamente la totalidad de la población mundial. Sin embargo, las estrategias para alcanzar los objetivos no terminan por ser efectivas por la falta de consensos entre diferentes grupos de interés (es decir: científicos, responsables políticos, productores y consumidores). Una primera aproximación a este problema muestra la disparidad de criterios en la que los diferentes agentes dinamizadores de la economía



trabajan, en otras palabras “no hablamos el mismo lenguaje”. La HC nace con el objetivo de dar respuesta a esta necesidad. Actualmente es un área de investigación activa en la que se están desarrollando importantes avances y propuestas, tanto en el ámbito técnico como científico y político (Peters 2010; Wiedmann et al. 2011b). La justificación de estos avances reside en la capacidad del indicador para establecer estrategias que permitan alinear motivaciones entre todos los grupos de interés y así alcanzar los apoyos necesarios para el avance en la consecución del Desarrollo Sostenible.

2.1. Origen y enfoques de la Huella de Carbono

Entre todas las definiciones presentes, la más comúnmente referenciada es la proporcionada por Wiedmann y Minx en 2008. Estos autores definen la HC como la cantidad total de emisiones de CO₂ que son directamente e indirectamente causadas por una actividad o acumuladas en las fases del ciclo de vida de un producto. En ese mismo año la “*British Standards Institution*” (en español, Instituto Británico de Estandarización) publica la primera norma de estandarización al respecto, denominada PAS 2050 y centrada en la HC de producto (BSI 2008). Esta publicación define el indicador HC de producto como la cantidad total de GEI emitidos durante el ciclo de vida de un proceso o producto. A raíz de estas dos definiciones aparecen consensos sobre el interés de contabilizar el conjunto de GEI por medio del factor conocido como Potencial de Calentamiento Global.

La HC es un indicador aplicable a cualquier tipo de actividad (individuo, organización, territorio, evento, producto o servicio) y las capacidades del indicador pueden ser descritas en función de múltiples escalas (inventarios municipales,



Capítulo 1. Introducción

regionales y nacionales; comercio de bienes y servicios; conductores de emisiones; sectores económicos; cadenas de suministro; organizaciones; hogares; hábitos de consumo) (Minx y Guan 2010; Peters 2010). Sin embargo, entre las aplicaciones destacan dos ramas o enfoques principales. De esta forma se suele distinguir entre un enfoque corporativo o a organización (en adelante enfoque a organización) y un enfoque a producto o servicio (en adelante enfoque a producto).

La HC con enfoque a organización deriva de los esfuerzos para la elaboración de Inventarios de GEI basados en el consumidor. Este enfoque, aplicado generalmente en territorios y la gran empresa, se caracteriza por su presencia dentro de las memorias de sostenibilidad de las grandes corporaciones. La principal base normativa para la elaboración del cálculo de la HC desde el enfoque a organización es el estándar internacional denominada “*GHG Protocol*” (en español, Protocolo GEI) publicado por las organizaciones internacionales auspiciadas por las Naciones Unidas “*World Resource Insititute*” (en español, Instituto Mundial de los Recursos) y “*World Business Council for Sustainable Development*” (en español, Consejo Mundial de Empresas para el Desarrollo Sostenible) (WRI y WBCSD 2004). Las directrices del IPCC para la elaboración de inventarios nacionales han tenido una importante influencia en lo relativo a la cuantificación de las emisiones directas –por ejemplo, quema de combustibles fósiles y cambios de uso de suelo– (IPCC 1996, 2006). Los avances normativos en lo relativo a la HC de organizaciones se han realizado por medio del desarrollo de las normas ISO 14064 e ISO 14069, así como nuevas ediciones, tanto generales como específicas, del “*GHG Protocol*”. La dificultad de alcanzar consensos internacionales durante la publicación de la ISO 14069 ha hecho que la norma se publique bajo la consideración de informe técnico (ISO/TR



14069:2013). No obstante, ambos avances normativos no terminan por acuñar el término “HC” y promueven únicamente la terminología de “Inventario de GEI”.

La HC con enfoque a producto deriva del desarrollo científico y normativo del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Este enfoque se aplica generalmente a importantes productos comerciales y se caracteriza por realizarse sobre el ciclo de vida del producto en cuestión (en ocasiones incluyendo las fases de uso y fin de vida). La principal base normativa para la elaboración de los cálculos de la HC de producto es la norma ISO 14040, cuya primera versión es de 1997. En el año 2006 se publica la revisión de dicha norma sustituyendo las elaboradas ISO 14041, 14042 y 14043. Además, se publica la ISO 14044 en donde se detallan requisitos y directrices. Al publicar esta última norma, el ACV pasa de ser una norma de principios y directrices a ser una norma de requisitos y, por tanto, válida para desarrollar esquemas de certificación. En 2011 *“World Resource Insititute”* y *“World Business Council for Sustainable Development”* publican un estandar específico para productos *“Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard”* (WRI y WBCSD 2011). La norma específica de la HC de producto (ISO 14067) ha sido publicada bajo la consideración de especificación técnica (ISO/TS 14067:2013). Sin embargo, en esta ocasión y a diferencia del caso del informe técnico ISO/TR 14069, se establece la denominación concreta del término “HC de producto”.

El cálculo de la HC se puede enfocar metodológicamente en dos direcciones: de abajo hacia arriba (en adelante, *“bottom-up”* por su extendido uso en nuestro idioma) mediante el empleo de ACV, o de arriba hacia abajo (en adelante, *“top-down”* por los anteriores motivos) a partir de la Extensión Ambiental del Análisis Input-Output. A continuación se presentan los fundamentos de ambos análisis.



2.2. Huella de Carbono y Análisis de Ciclo de Vida

El cálculo de la HC con enfoque a producto ha sido desarrollado tradicionalmente bajo las directrices del ACV. El ACV es un método de trabajo que estudia cómo la generación o demanda de un producto o servicio específico inician procesos que pueden causar impactos ambientales.

2.2.1. Descripción general

Los primeros estudios basados en el ACV comenzaron en los años 60, siendo uno de los más referenciados el estudio desarrollado por el Instituto de Investigación de norte-centro de los Estados Unidos (en inglés, *"Midwest Research Institute"*) para la empresa Coca-Cola® en 1969. En estos estudios se analiza el consumo de materias primas y energía demandadas en los procesos de producción, realizándose un inventario de los mismos. Sin embargo, no es hasta 1989, cuando la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (en inglés, *"Society of Environmental Toxicology and Chemistry"*) pone nombre de ACV a la metodología y establecen las primeras bases científicas (Barnthouse et al. 1989; Fava 1991). A partir de entonces se suceden los grupos de trabajo a fin de dar continuidad a las bases conceptuales establecidas (SETAC 1993, 1990).

En 1992 tuvo lugar en Florida (Estados Unidos) el primer seminario sobre ACV organizado por la Sociedad de Medio Ambiente, Toxicología y Química (en inglés, *"Society of Environmental Toxicology and Chemistry"*). El seminario pretendía unificar los criterios y conceptos que existían hasta ese momento y así crear un marco de referencia para la realización de trabajos. Ese mismo año se publicó la



primera guía en la que se desarrollaba un método de evaluación de impacto para el ACV (Heijungs et al. 1992). Dicho método fue más tarde aprobado por el conjunto de la comunidad científica, siendo el primer Código Internacional de ACV (SETAC 1993).

La elaboración y publicación de este primer Código Internacional marcó el inicio del auge de los ACV. Así, en los siguientes años se organizaron diversos seminarios para la discusión de nuevos retos relativos a la metodología: las dificultades en la asignación de co-productos (Huppel y Schneider 1994), la definición de los límites del sistema (Christiansen 1997) y las metodologías de evaluación del impacto (Haes et al. 2004). Así, en la década de los 90 se realizaron centenares de trabajos comerciales a fin de comparar productos con iguales funciones. En 1994, la Organización Internacional de Normalización inicia los trabajos para publicar una norma que estableciese principios y referencias con el objetivo de buscar la homogenización internacional en la interpretación de los resultados. Finalmente en 1997 se publica la norma ISO 14040. El año 2002 destaca por dos importantes acontecimientos. El primero fue la publicación del Manual sobre el ACV (en inglés, *"Handbook on life cycle assessment"*) de trascendental importancia para el elaboración de estudios (Guinée et al. 2002). En segundo lugar la creación de la *Iniciativa Ciclo de Vida*, una organización internacional auspiciada por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y por la Sociedad de Medio Ambiente, Toxicología y Química. Desde entonces, esta unión de fuerzas ha permitido el desarrollo de herramientas que evalúan las oportunidades y riesgos asociados a productos y servicios en su ciclo de vida.

El siguiente avance trascendental se realiza en el año 2006 con la revisión del



Capítulo 1. Introducción

estándar de normalización ISO 14040:2006 y la publicación de la norma ISO 14044:2006. El año 2011 destaca por la ya mencionada publicación del estándar “*Product GHG Protocol*” (WRI y WBCSD 2011) y la revisión del estándar británico PAS 2050 (British Standard Institute 2011). Los mencionados esfuerzos realizados dentro de la Organización Internacional de Normalización para la publicación de la norma específica de la HC de producto “ISO 14067” culminan sin éxito en el año 2013. Es por ello que se publica con rango de especificación técnica. En los próximos 3 años dicha especificación técnica estará abierta al público general a la espera de que sea votada de nuevo en 2016 para convertirse en una norma Internacional.

En la actualidad el enfoque metodológico de ACV cuenta con un alto nivel de actividad que trasciende a la Sociedad de Medio Ambiente, Toxicología y Química y se integra en el ámbito de otras sociedades y empresas. Diversas sociedades científicas como la Sociedad Internacional de Ecología Industrial (en inglés, “*International Society for Industrial Ecology*”) hospedan congresos internacionales centrados en la temática de ACV. Desde el ámbito privado, empresas como Pré Consultants (Amersfoort, Países Bajos) establecen foros muy activos para el apoyo de técnico y científico en estudios.



2.2.2. Limitaciones del Análisis del Ciclo de Vida

El ACV requiere la aplicación de criterios de corte para excluir aquellas operaciones que no se espera puedan generar contribuciones significativas sobre el impacto total generado por producto. En este sentido, el criterio subjetivo del analista entra en juego. Algunas estimaciones apuntan a que los cálculos de la HC realizados mediante la aplicación de Análisis de Procesos –técnica comúnmente empleada en los estudios de ACV- no contabilizan por término medio el 30% del valor total de la HC (Lenzen et al. 2010; Majeau-Bettez et al. 2011). Un caso frecuente es la exclusión de las infraestructuras y las maquinarias como procesos en los ACV; diferentes estudios muestran que esta exclusión influye de manera notable en los resultados finales del análisis realizado (Frischknecht et al. 2007). Este fenómeno recibe el nombre de *truncamiento* (en inglés, “*truncation*”) del que existe una amplia literatura científica (Deng et al. 2011; Lenzen, 2002; Majeau-Bettez et al. 2011).

Los ACV ofrecen resultados agrupados por fases y procesos para los que, en muchas ocasiones, no se detalla la localización –es decir, el lugar en el que se producen las emisiones– ni la temporalidad –el momento en el que se producen las emisiones–. Tampoco se evalúa si estos impactos interactúan, a su vez, con otros impactos. Estas deficiencias han sido señaladas por diversos autores (por ejemplo, Finnveden et al. 2009) concluyendo que el ACV no puede considerarse como sustituto de otros estudios ambientales, tales como la Evaluación de Riesgos Ambientales o la Evaluación de Impacto Ambiental.

La influencia de las bases de datos sobre los trabajos de ACV es de gran relevancia. Las emisiones por unidad de un mismo producto o proceso presentan



Capítulo 1. Introducción

variaciones de hasta un 150% en función de la base de datos empleada (Kendall et al. 2009). Por tanto existe un claro riesgo derivado del ánimo comercial de proporcionar impactos ambientales lo más bajos posibles. Prueba de esta evidencia es la actual proliferación de bases de datos (véase la Tabla 1.2).

Tabla 1.2: Principales características de las Bases de datos disponibles para la elaboración de Análisis de Ciclo de Vida. Modificado de GHG Protocol (2014).

Nombre	Método	Licencia	Año	Localización	Procesos
3EID (Embodied Energy and Emission)	Input-Output	Libre	1990-2005	Japón	400
Athena Life Cycle Inventory Product	Procesos	Libre	1993-1997	EEUU, Canada	50
Australian National Greenhouse	Varios	Libre	1990-2010	Australia, Global	300
Bath Inventory of Carbon and Energy	Procesos	Libre	1977-2010	Reino Unido	400
Bilan Carbone TM	Varios	Libre	2001-2006	Francia, Europa	200
BEAT v2.1 Biomass Environmental	Procesos	Libre	1990-2010	Reino Unido	50
Boustead Model	Procesos	Pago	n.d.	Global	6.000
Green Book Live Provider: Building	Procesos	Libre	2000-2011	Reino Unido	777
BUWAL 250 Library TM	Procesos	Pago	1996-2000	Suiza	300
Canadian Raw Materials Database	Procesos	Libre	1998-2000	Canadá	18
Carbon Calculations over the Life Cycle	Procesos	Libre	Varios	Global	5.500
Carnegie Mellon: EIO-LCA	Input-Output	Libre	1992-2002	5 Países	3.500
Centre for Environmental Assessment	Procesos	Libre	1990-2010	Global	700
Centre for Sustainability Accounting	Input-Output	Libre (Defra)	2004-2008	Reino Unido	125
CLCD (Chinese Life Cycle Database)	Procesos	Software pago	2009-2011	China	600
Climate Earth Inc.: CEDA Factors for	Input-Output	Pago	2002	EEUU	417
Danish Food: LCA Food Database	Procesos	Libre	2000-2003	Dinamarca	40
DEAM – Data for Environmental	Procesos, híbridos	Libre	2001-2006	France, Europa	1.200
2010 Guidelines to Defra / DECC's GHG	Varios	Libre	1990-2010	Reino Unido,	300
E3IOT	Input-Output	Software pago	n.d.	Europa	500
Ecoinvent Database v2.2	Procesos	Pago	1990-2010	Países, Regiones,	4.000
EIME (Environmental Improvement	Procesos	Pago	1951-2009	UE 25	800
ELCD: European Reference Life Cycle	Procesos	Libre	2006-2010	Europa	300
Encompass TM	Procesos, híbridos	Pago	2009	Canadá	250
Environmental Product Declarations	Procesos	Libre	2007-2010	Global	149
ETH-ESU 96 libraries	Procesos	Libre	1996	Suiza, Europa	n.d.
ESU-services data-on-demand LCIA	Procesos	Pago	Actual	Global, Europa,	4.000
Environmental Profile Report for the	Procesos	Libre	2005	UE 25	6
European Container Glass Association	Procesos	Libre	2007	UE 27 + Suiza	1
European Copper Institute (ECI): Life	Procesos	Libre	2005	UE 25	3
European Database for Corrugated	Procesos	Libre	1999-2008	Europa	5
Footprint Expert: Carbon Footprint	Procesos	Pago	2007-2011	Reino Unido,	200
Franklin US LCI Database	Procesos	Libre	n.d.	EEUU	30
Global Emission Model for Integrated	Procesos	Libre	1990 - 2010	Global, Alemania	5.000
Greenhouse Gas Protocol	Procesos	Libre	2003 - 2010	Global	800
Greet 1.8D.1 (fuel cycle) and Greet 2.7	Procesos	Libre	1996-2010	EEUU	80
iLCA2010+ LCI Data Base System	Procesos	Pago	2010	Global	1.800
IEA GHG CO ₂ Emissions Database	Procesos	Libre	1996-2003	Global	1.400
IISI Life Cycle Inventory Study for Steel	Procesos	Libre	2010	Global	14
Life Cycle Inventory / Analysis of	Procesos	Libre	2005	Global	8
Zinc Environmental Profile	Procesos	Libre	2005	Global	3
IDEA (MiLCA)	Procesos	Software pago	2010	Global	3.000
IPCC Emissions Factor Database	Procesos	Libre	Actual	Global	n.d.
IVAM LCA DATA 4	Procesos	Libre	2004	Holanda, Europa,	1.350
Korea LCI database	Procesos	Libre	1999-2007	Korea	341
U.S. Life-Cycle Inventory Database	Procesos	Libre	2006	USA, Global	100
OPEN IO	Input-Output	Libre	1998-2007	USA	3.000
Eco-Profiles of the European Plastics	Procesos	Libre	1993-2010	Europa	100
ProBas (Prozessorientierte Basisdaten	Procesos	Libre	2000-2010	Alemania, Global	8.000
Swiss Agricultural Life Cycle	Procesos	Pago	2004	Suiza	700

n.d.: no disponible



2.3. Huella de Carbono y Análisis Input-Output

El cálculo de la HC en base al Análisis Input-Output ha sido sujeto de un gran número de aplicaciones y desarrollos metodológicos. Su capacidad para determinar y analizar inventarios de emisiones desde el punto de vista del consumidor ha permitido poner magnitud a fenómenos tan relevantes como el caracterizado por la deslocalización de industrias contaminantes en países con nula o escasa regulación ambiental, denominado *fuga de carbono*.

2.3.1. Descripción general

Uno de los retos más ambicionados por los economistas ha sido encontrar el modo de representar, mediante esquemas sencillos, la compleja estructura económica mundial. El primer desarrollo de esta idea fue llevado a cabo por el economista francés François Quesnay, que en 1758 publicó Tabla Económica (en francés, "*Tableau Économique*"), en la que se representaba de manera sistemática la distribución de gastos de una economía (Miller y Blair 2009). Un siglo después de la publicación de Quesnay, Leon Walras (1834-1910) construyó un sistema de ecuaciones simultáneas que describían las interacciones entre compradores y vendedores, creando de esta manera el primer modelo de equilibrio general, en el cual se describían las relaciones de interdependencia existentes entre los componentes que forman el sistema económico. Sin embargo, no fue hasta medio siglo más tarde cuando estos avances calaron en las instituciones por medio del impulso y contribución de grandes teóricos como el economista ruso Wassily Leontief (1905-1999).



En 1936, Wassily Leontief presentó su primer estudio sobre las relaciones intrínsecas entre sectores de la economía de Estados Unidos (Leontief 1936). Cinco años después publicó su primer libro, *"The Structure of the American Economy, 1919-1939"* (Leontief 1941), en el que exponía las bases y aplicaciones de lo que se conoce como Análisis Input-Output, y que posteriormente revisaría el mismo autor (Leontief 1953). Leontief introdujo tres simplificaciones sobre el modelo de Walras. En primer lugar, agrupó diferentes mercancías en grupos homogéneos o sectores, suponiendo que cada sector produce un grupo de mercancías con la misma tecnología. En segundo lugar, introdujo una función lineal y homogénea para describir las relaciones entre la demanda y oferta. Por último, consideró los sectores finales (consumo, inversión, comercio exterior) como sectores productivos endógenos o exógenos al análisis. Gracias a estos avances y a las aplicaciones del esquema económico propuesto, Leontief fue galardonado en 1973 con el premio Nobel de Economía.

Posteriormente, el Análisis Input-Output ha seguido evolucionando gracias a otros economistas, como el premio Nobel Richard Stone, y al desarrollo de la computación. Los logros alcanzados mediante estas aportaciones han sido muy numerosos. A día de hoy, todos los países miembros de la Unión Europea tienen implantado el denominado Sistema Europeo de Cuentas (SEC-95) a fin de homogenizar los cálculos dado que su fundamento se inserta en el Análisis Input-Output. Similares reglas contables han sido aplicadas en todos los países del mundo a través de las Naciones Unidas. La implementación de dichas reglas permite generar estadísticas armonizadas y fiables de la estructura económica de cada país. Estos avances en la armonización mundial de las cuentas nacionales ha permitido la generación de las reconocidas tablas o matrices MRIO (nótese que en el presente



documento se hace referencia a tabla y matriz indistintamente).

Finalmente, los economistas están alcanzando ese gran reto relativo a la concreción de la compleja estructura económica mundial. Las aplicaciones de estas tablas trascienden la economía, llegando a solucionar problemas en los campos sociales y sobre todo, ambientales, tal y como a continuación se expone.

2.3.2. El Análisis Multi-Región Input-Output

El Análisis MRIO tiene su base en las tablas MRIO. Estas tablas son un conjunto de ecuaciones que describen el flujo de bienes y servicios entre los distintos sectores de diferentes economías en un período determinado. Su estudio permite medir los impactos directos e indirectos asociados a, por ejemplo, un cambio en la demanda de bienes y servicios.

El origen de las tablas MRIO está en la combinación de las tablas Input-Output nacionales (tablas simétricas) que, a su vez, provienen de las tablas origen y destino. La tabla origen (Figura 1.6) muestra la oferta de bienes y servicios por producto y tipo de proveedor, distinguiendo la producción nacional y las importaciones. La tabla de destino (Figura 1.7) muestra el empleo o uso que hace la economía de los bienes y servicios por producto y tipo de empleo. Es decir, indica lo que se destina a consumos intermedios, consumos finales, formación de capital y exportaciones.



TABLA ORIGEN		Ramas de actividad			Resto del mundo	Total
		1	2	...		
Productos ...	1	Producción del producto 1 por la rama 1	Producción del producto 1 por la rama 2	...	Importaciones del producto 1	Oferta total del producto 1

Total		Producción total de la rama 1	Producción total de la rama 2	...	Importaciones totales	Oferta total

Figura 1.6: Esquema de una tabla origen simplificada

TABLA DESTINO		Ramas de actividad		Resto del mundo	Consumo final	Formación bruta de capital	Total
		1	...				
Productos	1	Consumo intermedio por producto y rama	...	Exportación del producto 1	Gasto en consumo final		Total del producto 1

Componente del valor añadido		Valor añadido por componente y rama de actividad					
Total		Insumos totales por rama de actividad					

Figura 1.7: Esquema de una tabla destino simplificada

Las tablas simétricas Input-Output resultan de la combinación de las dos tablas anteriores. Con ello se pretende mostrar la relación entre el consumo (inputs) y la producción (outputs) de cada rama de actividad. Las tablas origen y destino no son simétricas pues hay sectores que producen más de un bien que son producidos por diferentes sectores o ramas de actividad. Para poder transformar las tablas origen y destino en una matriz simétrica se debe asumir una de las siguientes 2 hipótesis: (1) la tecnología del producto asume que cada producto se produce con la misma tecnología independientemente de la industria en donde se produzca; y (2) la tecnología de la industria asume que cada industria produce diferentes productos con



la misma tecnología. Esta última hipótesis es la generalmente asumida siendo el caso empleado para la matriz simétrica de la contabilidad nacional de España (De la Rúa Lope 2009). La Figura 1.8 describe de manera simplificada un esquema de una tabla Input-Output donde los inputs de cada rama de actividad o sector se sitúan en columnas y los outputs en filas, indicando cómo se ha distribuido la producción de cada rama de actividad entre los distintos usos posibles.

	Consumos de los sectores				Demanda final		Total
		1	2	n	Doméstica	Exportaciones	
Producción de los Sectores	1	X_{11}	X_{12}	X_{1n}	Y_{1n}	E_{1n}	Σ_1
	2	X_{21}	X_{22}	X_{2n}	Y_{2n}	E_{2n}	Σ_2
	n	X_{n1}	X_{n2}	X_{nn}	Y_{nn}	E_{nn}	Σ_n
Valor Añadido		Z_{n1}	Z_{n2}	Z_{nn}			
Importaciones		I_{n1}	I_{n2}	I_{nn}			
Total		Σ_1	Σ_2	Σ_n			

Figura 1.8: Esquema de una tabla Input-Output simplificada

La combinación de diferentes tablas Input-Output provenientes de distintas regiones da lugar a las tablas MRIO (ver Figura 1.9). Los primeros trabajos de análisis de este tipo de tablas MRIO datan de los años 50 (Chenery 1953; Isard 1951; Moses 1955, citado por Polenske 1989). Estos trabajos realizaban análisis por regiones de un determinado país. Sin embargo, no es hasta los años 90 cuando el Proyecto para el Análisis Global del Comercio (en inglés, “*Global Trade Analysis Project*”) lanza las primeras tablas GTAP (acrónimo en inglés) capaces de generar Análisis MRIO de gran parte de la economía mundial (Hertel 1997). En los inicios del siglo XXI el análisis de tablas MRIO cobra aún mayor pujanza gracias a las aplicaciones ambientales (Wiedmann et al. 2007).



	Consumos intermedios			Demanda Final			Total
	País A	País B	RdM	País A	País B	RdM	
País A	Domésticos	Por B de A	Por RdM de A	doméstica	Por B de A	Por RdM de A	Σ_A
País B	Por A de B	Domésticos	Por RdM de B	Por A de B	doméstica	Por RdM de B	Σ_B
RdM	Por A de RdM	Por B de RdM	Domésticos	Por A de RdM	Por B de RdM	doméstica	Σ_{RdM}
Valor Añadido	I_A	I_B	I_{RdM}				
Total	Σ_A	Σ_B	Σ_{RdM}				

RdM: Resto del Mundo

Figura 1.9: Esquema de una tabla Multi-Región Input-Output con 3 regiones.

2.3.3. Extensión Ambiental del Análisis Input-Output

La Extensión Ambiental del Análisis Input-Output ha permitido vincular la demanda final de bienes y servicios con las emisiones, directas e indirectas, asociadas a su producción, independientemente del país donde éstas se localicen. Su relevancia para el desarrollo de inventarios de GEI desde el punto de vista del consumidor ha sido combinada con el avance en la publicación de tablas globales MRIO.

Los primeros trabajos que emplean esta metodología se centraron en el análisis de los inventarios de emisiones desde el punto de vista del consumidor de un gran número de regiones y países. Algunos de los trabajos más relevantes fueron los realizados sobre: países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (Ahmad y Wyckoff 2003; Wyckoff y Roop 1994), Japón (Kondo et al. 1998), Australia (Lenzen 1998), Dinamarca (Munksgaard y Pedersen 2001), Brasil (Machado et al. 2001), España (Sánchez-Chóliz y Duarte 2004), Noruega (Peters y Hertwich 2006), Italia (Mongelli et al. 2006), Finlandia (Mäenpää Siikavirta 2007), comercio internacional entre Japón y Estados Unidos (Ackerman et al. 2007), Tailandia (Limmeechokchai y Suksuntornsiri 2007), Turquía (Tunç et al.



2007) y Estados Unidos (Weber y Matthews 2008). Posteriormente, la revisión hecha por Wiedmann (2009) analiza un total de 30 trabajos publicados entre los años 2007 y 2009. A modo de resumen, las Figuras 1.10 y 1.11, muestran el aumento tanto en el número de publicaciones, como en el número de citas por publicación.

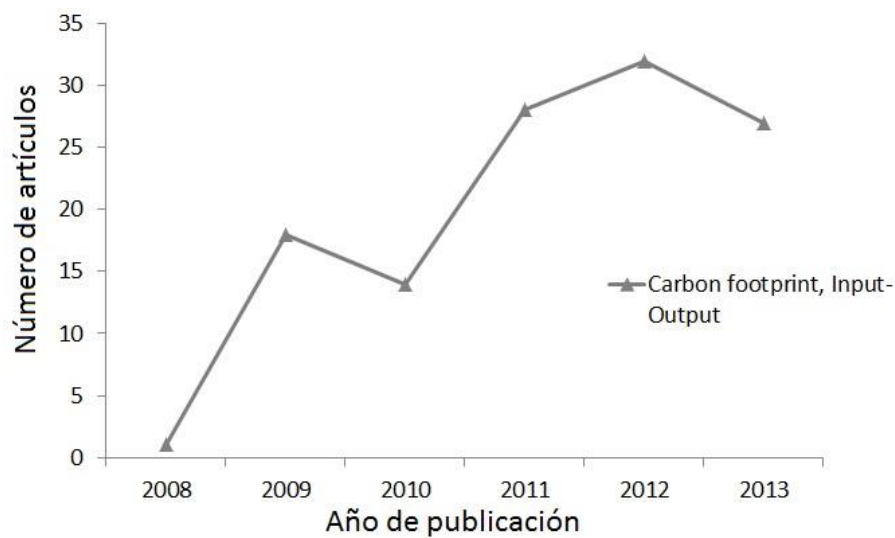


Figura 1.10: Número de artículos con el tema de “*Carbon footprint*”e “*Input-Output*” proporcionados por el buscador “*Web of Science*” a fecha 20 de Enero de 2014.

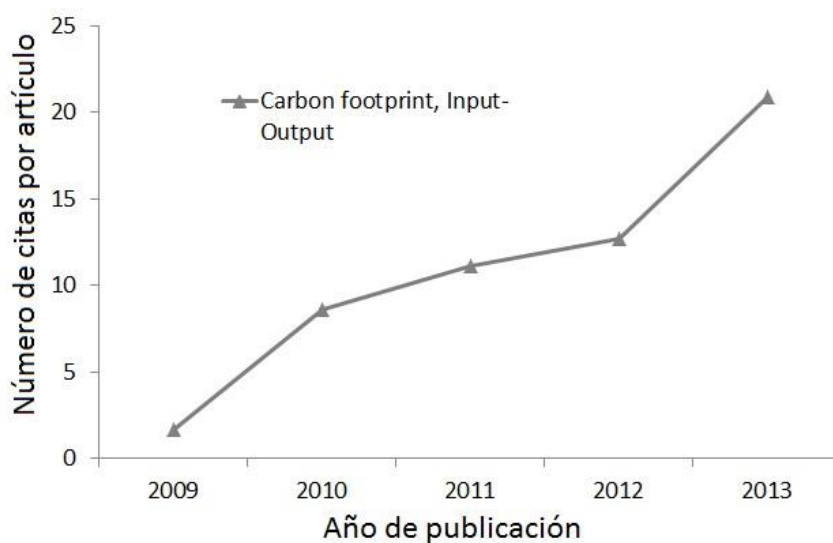


Figura 1.11: Número de citas por artículo con el tema de “*Carbon footprint*”e “*Input-Output*” proporcionados por el buscador “*Web of Science*” a fecha 20 de Enero de 2014.

Los incrementos descritos tanto en el número de artículos como en el número de citas por artículos –obsérvese que el incremento en número de citas es superior al 1.000% en apenas 4 años– se han visto influenciados por dos grandes acontecimientos. Por una parte, la publicación con acceso libre de tablas globales para el Análisis MRIO (por ejemplo, EXIOPOL, EORA y WIOD). Por otra parte, el avance en cuanto la homogenización internacional de las cuentas ambientales. En este sentido puede verse el ejemplo de la aprobación en la UE de la reglamentación para la notificación obligatoria de las cuentas ambientales (European Parliament y Council 2011). Este reglamento establece un marco común para la recopilación, elaboración, transmisión y evaluación de las cuentas económicas europeas y del medio ambiente. Esta nueva regulación establece que el conjunto de cuentas ambientales sea agrupado en los siguientes módulos: (1) emisiones al aire, (2) impuestos ambientales de las actividades económicas, (3) flujo de materiales de las actividades económicas y



(4) bases para ampliar a cuentas de energía y agua.

2.3.4. Limitaciones del Análisis Input-Output

Las aplicaciones derivadas del Análisis Input-Output resultan de gran utilidad para la toma de decisiones. Sin embargo, cuentan con algunas limitaciones generadas por la necesaria simplificación de la realidad. Estas limitaciones deben ser consideradas en el momento de su utilización y con posterioridad en la interpretación de los resultados. En primer lugar, la construcción de las tablas Input-Output se fundamenta en una de las hipótesis de tecnología de industria o de producto. Ninguna de estas hipótesis puede responder con fidelidad a la realidad económica dado que la tecnología cambia entre productos de una misma industria y viceversa (De la Rúa Lope 2009).

En segundo lugar, se asume que los sectores son homogéneos, de modo que distintos cambios en la producción de bienes y servicios generan un cambio lineal. En otras palabras, los coeficientes técnicos son fijos y las necesidades de un sector vienen exclusivamente determinadas por la cantidad de producto que vaya a ser producida. Por lo tanto, asumiendo que los datos de entrada para los Análisis Input-Output son expresados en unidades monetarias (véase excepciones en Wiedmann et al. –2013–), no se consideran efectos derivados de las variaciones de precio (Suh y Nakamura 2007). De igual manera tampoco se incorporan influencias por la existencia de bienes sustitutivos o fenómenos de economías de escala (Caldés et al. 2009).



El Análisis Input-Output tampoco considera la capacidad de almacenaje de bienes. El modelo asume que cualquier incremento en la demanda va a ser siempre satisfecho mediante una nueva producción (De la Rúa Lope 2009). En lo relativo a recursos disponibles para la producción, el Análisis Input-Output no tiene en cuenta la existencia de limitaciones de ningún tipo. Por tanto, se asume que la capacidad de producción de un determinado bien o servicio es ilimitada. Asimismo, el modelo considera que todos los recursos son utilizados de modo eficiente y a plena capacidad por su correspondiente sector productivo (Caldés et al. 2009).

La elaboración de tablas globales Input-Output resulta costosa en tiempo y dinero. A modo de ejemplo, la generación de la tabla global EXIOPOL publicada en 2011 requirió un presupuesto de 5 millones de euros y el tiempo necesario para la elaboración se cifra entre 1 a 5 años (Tukker 2011). Véase también la demora de 2 años para la reciente publicación de las tablas WIOD del año 2011, publicadas en Diciembre del año 2013. Es por ello que los cambios en la tecnología de producción, los avances tecnológicos o la utilización de mejores tecnologías disponibles, no consiguen ser reflejados de una manera inmediata en las tablas.

2.4. Huella de Carbono: Análisis Híbrido y enfoque integrado

Por un lado, el Análisis Híbrido tiene la virtud de combinar las dos direcciones metodológicas de cálculo (es decir, *bottom-up* y *top-down*). Por otro lado, el *enfoque integrado* tiene el objetivo de desarrollar un enfoque único de cálculo válido tanto para organizaciones como para productos.



2.4.1. Descripción del Análisis Híbrido

La elección de un método de análisis de la HC “*bottom-up*” o “*top-down*” depende de los objetivos planteados, de la escala de análisis, así como de la disponibilidad de datos y de recursos. En general, el Análisis Input-Output es preferible para determinar la HC de macro- y meso-sistemas, como por ejemplo grandes corporaciones, el sector doméstico, los sectores industriales, los países y los gobiernos (Wiedmann y Minx 2007). En cambio, los ACV desarrollados mediante el Análisis de Procesos presentan claras ventajas para estudiar micro-sistemas, tales como procesos específicos o productos.

El Análisis Híbrido combina ambos enfoques y posibilita el disfrute de las ventajas de precisión y detalle, presentes en el Análisis de Procesos, junto con las ventajas de mayor escala y comparabilidad, propia de los Análisis Input-Output (Heijungs et al. 2006). Aunque los primeros trabajos de hibridación se realizaron en la década de los 70 (por ejemplo, Bullard et al. 1978), la amplia aplicación de Análisis Híbridos ocurre en la década de los 90 con el impulso del ACV (por ejemplo, Hendrickson et al. 1998; Lave et al. 1995; Moriguchi et al. 1993). El principal interés en el desarrollo de estos análisis proviene de solucionar el problema conocido como truncamiento. Tal y como se presentó en el apartado 2.2.2, este fenómeno se genera por la dificultad de establecer los límites del sistema en análisis. De manera habitual se produce en la aplicación de las técnicas de Análisis de Procesos donde los procesos se propagan y proliferan a lo largo de la cadena de suministro siendo necesarios los criterios subjetivos para el establecimiento de los límites del sistema.

Entre los esfuerzos más relevantes por afrontar los avances metodológicos del



Análisis Híbrido destacan los realizados por Suh y Huppes (2005), Suh y Lippiatt (2012) y Suh y Nakamura (2007). En la primera década del siglo XXI, son muchos los trabajos que señalan la necesidad de realizar este tipo de análisis (por ejemplo, Lenzen y Munksgaard, 2002). Sin embargo, las revisiones más recientes concluyen que este tipo de estudios son todavía escasos y que los Análisis Híbridos todavía no se han convertido en una práctica habitual en los estudios de la HC (véase para el caso de la energía eólica, Arvesen y Hertwich -2012-). La Figura 1.12 muestra el reducido uso que se hace de los Análisis Híbridos frente a los trabajos de basados en ACV y Análisis Input-Output. Según algunos autores (Majeau-Bettez et al. 2011) la falta de implantación se justifica por el hecho de ser más difíciles de realizar y requerir datos adicionales. Pese al reducido número de publicaciones es muy destacable el alto crecimiento que ha experimentado el número de citas por artículo publicado (Figura 1.13). Siendo esto una evidencia de la importancia de su desarrollo e impulso desde el ámbito científico-técnico.

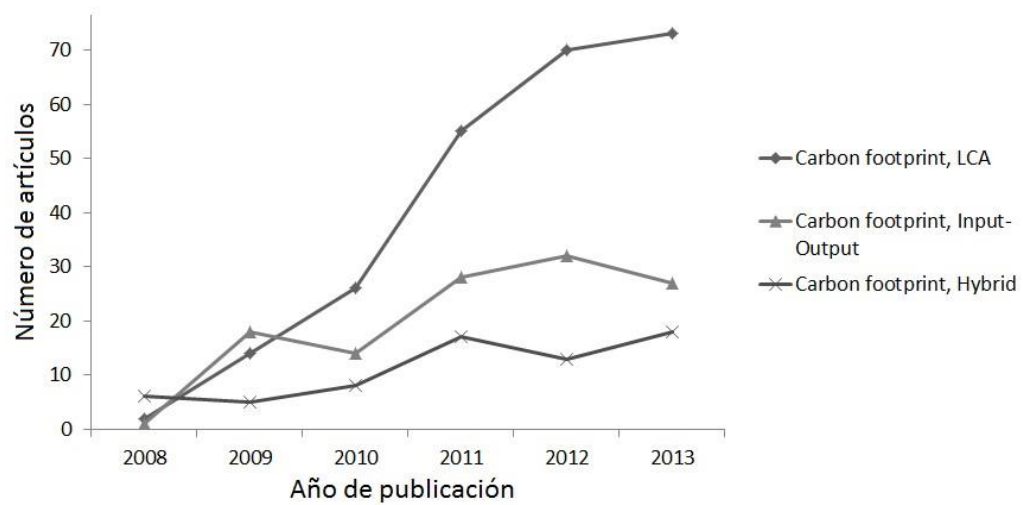


Figura 1.12: Número de artículos con el tema de “Carbon footprint” y respectivamente “LCA”, “Input-Output” e “Hybrid”. Datos proporcionados por el buscador “Web of Science” a fecha 20 de Enero de 2014.

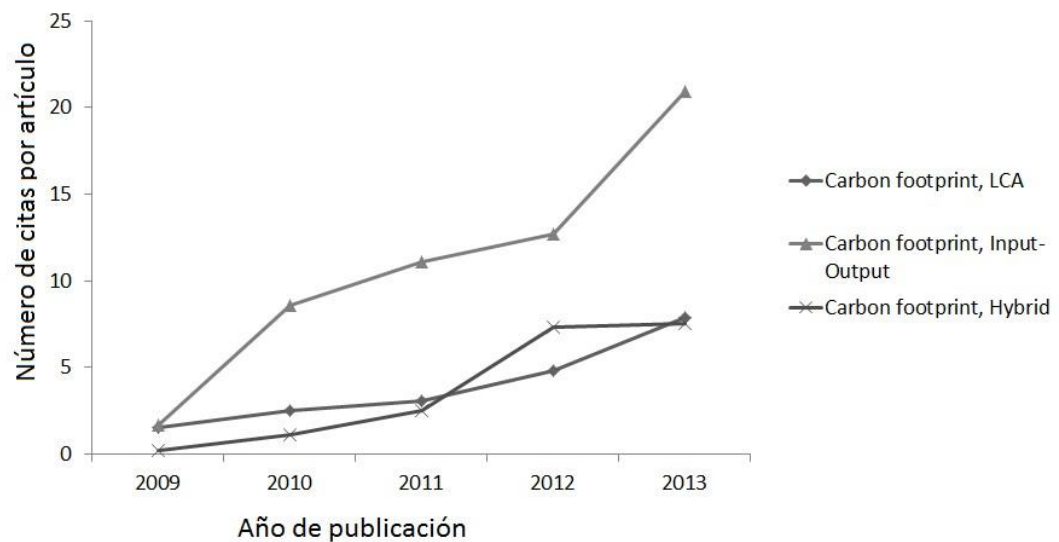


Figura 1.13: Número de citas por artículo con el tema de “Carbon footprint” y respectivamente “LCA”, “Input-Output” e “Hybrid”. Datos proporcionados por el buscador “Web of Science” a fecha 20 de Enero de 2014.



Los Análisis Híbridos se enfrentan a retos metodológicos muy relevantes . Sin embargo, su planteamiento es puede ofrece un nivel elevado de detalle y una cobertura casi completa de todo el sistema de producto. La no implementación de los Análisis Híbridos para el estudio de la HC puede generar errores de corte o falta de detalle en análisis que deben ser reconocidos en los trabajos en los que se aplica únicamente ACV o Análisis Input-Output.

2.4.2. Propuestas existentes de Análisis Híbrido

Los Análisis Híbridos se extienden a lo largo de todo el espectro de posibles combinaciones entre lo que es un ACV puro –por ejemplo, aplicación única de Análisis de Procesos– y un Análisis Input-Output puro. Por tanto un Análisis híbrido puede ser un Análisis de Procesos con una pequeña porción de Análisis Input-Output y viceversa (Suh 2004).

En sentido amplio, los Análisis Híbridos se pueden clasificar como: (1) Análisis Híbrido por Niveles, (2) Análisis Híbrido basado en Input-Output, (3) Análisis Híbrido Integrado y (4) Análisis Híbrido de Senda Estructural. Existen otras propuestas relativas al uso de tablas en unidades físicas que son consideradas también Análisis Híbridos; sin embargo, estas propuestas difieren de las anteriores en que no emplean datos relativos al Análisis de Procesos y por tanto no hay ninguna característica próxima al análisis “*bottom-up*” (Wiedmann et al. 2011b).



2.4.2.1. Análisis Híbrido por Niveles

El concepto de Análisis Híbrido por Niveles (en inglés *“Tiered Hybrid Analysis”*) aparece en la década de los 70 (Bullard et al. 1978). Dicho análisis consiste en la suma de un Análisis de Procesos –aplicado a las áreas y fases sobre las que se tiene información de proceso detallada–, y un Análisis Input-Output –para los requisitos de entrada restantes–. Algunos trabajos en esta línea son los de Engström et al. (2007), Joshi (1999), Suh y Hupples (2002), van Engelenburg et al. (1994) y Weinzettel y Kovanda (2009).

El Análisis Híbrido por Niveles proporciona resultados razonablemente completos y relativamente rápidos. Sin embargo, la frontera entre el Análisis de Procesos y el Análisis Input-Output debe ser cuidadosamente establecida, ya que diferentes criterios pueden generar errores significativos. El más significativo es la posibilidad de realizar una doble contabilidad. Por ejemplo, el transporte calculado por medio del Análisis Input-Output suele estar incluido en el impacto atribuido a los productos; sin embargo, esta entrada suele ser doblemente calculada por sumarse también el impacto mediante Análisis de Procesos. Por otro lado, al realizar dos cálculos por separado, no se pueden aplicar técnicas de análisis propias de ninguna de las dos ciencias (ACV y Análisis Input-Output). Así, por ejemplo, modificaciones en el país de origen de importaciones, son complicadas de evaluar en los Análisis Híbridos. Actualmente hay diferentes estudios que buscan solucionar este tipo de limitaciones con el fin de determinar la posible doble contabilidad (Strømman et al. 2009; Rowley et al. 2009).



2.4.2.2. Análisis Híbrido basado en Input-Output

El concepto de Análisis Híbrido basado en Input-Output (en inglés “IO-based Hybrid Analysis”) se lleva a cabo mediante la desagregación de los sectores de una tabla Input-Output. Si la industria j genera como producto principal i en una tabla desagregada se generan ja , jb , ia , ib en función de las posibles sub-industrias y sub-productos. Este procedimiento se puede realizar de forma iterativa, de manera que la tabla Input-Output aumentada se vuelve lo suficientemente precisa para llevar a cabo un análisis de mayor nivel de detalle. Algunos trabajos relevantes realizados mediante la aplicación de esta técnica de análisis son los de Hendrickson et al. (1998), Joshi (1999), Suh (2003), Treloar (1997) y Wiedmann et al. (2011a).

2.4.2.3. Análisis Híbrido Integrado

El concepto de Análisis Híbrido Integrado (en inglés “*Integrated Hybrid Analysis*”) tiene su origen en los trabajos basados en el Análisis de Procesos resueltos mediante el empleo de matrices de procesos desarrolladas en unidades físicas (por ejemplo, megajulios –MJ–, kilogramos –kg–, unidades, piezas). El primer trabajo con esta aproximación fue el desarrollado por Heijungs (1994). Posteriormente, el Análisis Híbrido Integrado evolucionó a la unión de una matriz de procesos (en unidades físicas) con una matriz Input-Output (en unidades económicas). El primer trabajo en esta segunda aproximación fue el desarrollado por Suh (2004), seguido de los trabajos realizados por Acquaye et al. (2011), Finnveden et al. (2009), Sangwon Suh y Huppes (2005), Suh y Nakamura (2007), Suh et al. (2004). Generalmente los procesos bajo control o propiedad son recogidos en unidades físicas, siendo analizados en el área



matricial relativa al Análisis de Procesos. El resto de procesos, donde no se dispone con facilidad de unidades físicas, se emplea el área matricial relativa al Análisis Input-Output. Dado que todo se opera con una única matriz es posible desarrollar un análisis en un marco coherente para la aplicación de técnicas de Análisis Input-Output.

Los últimos avances dentro del Análisis Híbrido Integrado están en la línea de hibridar bases de datos para hacer la información más accesible a nivel técnico (por ejemplo, Suh y Lippiatt, 2012). También se está trabajando en el empleo de estos sistemas para determinar y delimitar la incertidumbre de los Análisis de Procesos (Lee y Ma 2012).

2.4.2.4. Análisis Híbrido de Senda Estructural

El Análisis Híbrido de Senda Estructural (en inglés *“Structural Path Analysis”*) fue desarrollado por Lenzen (2007). Actualmente es reconocido en la literatura por su concreción metodológica denominada Análisis Híbrido por Intercambio de Sendas (en inglés *“Path Exchange Method”*). Ambas propuestas generan un excelente análisis para extraer y clasificar las emisiones de tablas Input-Output. El avance desarrollado permite el análisis en detalle de procesos en unidades físicas evitando la doble contabilidad y con un mínimo de información externa. Entre los trabajos realizados destacan los de Baboulet y Lenzen (2010), Lenzen y Crawford (2009), Strømman et al. (2009) y Wiedmann et al. (2011b).



2.4.2.5. Descripción del enfoque integrado

La comentada divergencia metodológica relativa al enfoque a organización *versus* el enfoque a producto deriva de la coetaneidad de dos ramas profesionales que han acuñado el término de la HC. Por un lado, profesionales de la elaboración de inventarios de GEI (predominantemente economistas). Y, por otro lado, profesionales de la elaboración de ACV (predominantemente químicos). En consecuencia el consumidor recibe la información de la HC desde dos enfoques diferentes. Esta divergencia metodológica, lejos de resolverse en favor de alguna de ellas, está amenazando la implantación de la HC puesto que ambos enfoques no son consistentes entre sí. Prueba de esta falta de integración es la reciente publicación de dos esquemas de normalización diferentes (ISO/TR 14067:2013 e ISO/TS 16069:2013). Es más, estos estándares de normalización no detallan un marco de referencia claro para el empleo de herramientas ni fuentes de información. Esta ambigüedad ha conducido a una preocupante proliferación de metodologías, junto con sus respectivas bases de datos asociadas. Así, según los informes publicados en 2010 por la Comisión Europea (Ernst & Young France y Quantis 2010; Marsh-Patrick 2010), se contabilizan un total de 44 metodologías y Programas de Comunicación de la HC con enfoque a producto y otras 80 con enfoque a organizaciones. Es más, actualmente existen más de 445 ecoetiquetas en el mundo en relación a impactos ambientales (Ecolabel Index 2014).

Esta proliferación de metodologías y ecoetiquetados, si bien demuestra el creciente interés por el indicador, conlleva un grave problema de comparabilidad sobre los resultados obtenidos. A menudo los métodos de cálculo y las fuentes



empleadas son dispares, dificultando así la homogeneidad y confianza sobre los resultados.

2.4.3. Propuestas de enfoque integrado

El enfoque integrado, denominado en la literatura científica como ACV de organización-producto, busca establecer los principios para el desarrollo de un ACV válido tanto para organizaciones, como para productos (incluyendo eventos, servicios, territorios, etc.) (Caglio et al. 2011). La búsqueda de un único método válido para organizaciones y productos está siendo trabajada en la actualidad desde diferentes perspectivas. En España destaca el Método Compuesto de las Cuentas Contables (Doménech, 2007) habiendo otras iniciativas en Reino Unido (Wiedmann et al. 2011a), Alemania (Schaltegger y Csutora 2012), Italia (Scipioni et al. 2012) y Estados Unidos (Suh y Lippiatt 2012). Sin embargo, ninguna de estas iniciativas internacionales ha desarrollado una herramienta de cálculo de la HC similar a lo desarrollado con el Método Compuesto de las Cuentas Contables objeto de estudio en la presente investigación.

2.4.4. Método Compuesto de las Cuentas Contables

2.4.4.1. Descripción general

El Método Compuesto de las Cuentas Contables (MC3, denominado en inglés, “*Compound Method based on Financial Accounts*”) es un método que surge a partir del trabajo realizado por Doménech (2007, 2004) basándose en la herramienta desarrollada para el cálculo de la Huella Ecológica en hogares por Wackernagel et al. (2000). Los trabajos de Doménech son posteriormente completados por Carballo



Penela (2009, 2010) a fin de ampliar el ámbito de aplicación a productos, es decir, a bienes y servicios. Los últimos avances del método están siendo desarrollados a través del Proyecto Carbonfeel (www.carbonfeel.org), dirigido desde la Fundación para la Cooperación Internacional Funciona con el apoyo de universidades, certificadoras y consultoras especializadas en la HC (Carbonfeel 2013). Actualmente el MC3 es un método ampliamente reconocido en España, avalado por un relevante número publicaciones en revistas científicas de carácter internacional (Alvarez et al. 2014; Cagiao et al. 2011; Carballo-Penela y Doménech 2010; Carballo-Penela et al. 2009).

MC3 se construye mediante la combinación de factores derivados del Análisis Input-Output y factores derivados del Análisis de Procesos. Por lo tanto, MC3 puede ser caracterizado dentro del conjunto de métodos de Análisis Híbrido por Niveles. Su implementación en empresas fue validada por el Observatorio de la Sostenibilidad de España –desafortunadamente sin actividad desde Junio de 2013–, destacando su reconocimiento como método válido para el Sistema de Compromisos Voluntarios de Reducción de Emisiones de GEI del Plan de Medidas Urgentes de la Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia, Horizonte 2007-2012-2020 (de la Cruz Leiva et al. 2011; MAGRAMA 2008). Actualmente dicho plan no está en funcionamiento, siendo en parte sustituido por los denominados Proyectos Clima (MAGRAMA, 2014) y el Registro de HC (RD 163/2014).

2.4.4.2. Descripción de los avances en el método

Tal y com se ha mencionad, el MC3 parte de la matriz de consumos y superficies presente en la herramienta para estimar la Huella Ecológica de los hogares



elaborada por Wackernagel et al. (2000). Posteriormente, Doménech (2007, 2004) establece nuevas secciones en la matriz con las que recoger los consumos y superficies asociados a residuos y usos del suelo desarrollando la primera versión de la herramienta MC3. Además, Domenech también trabaja en la implementación de factores de absorción ($\text{tCO}_2\text{e}\cdot\text{ha}^{-1}$) con los que transformar todos los impactos de la Huella Ecológica a la HC y viceversa.

Posteriormente, Domenech y Carballo desarrollan la versión 2.0 de la herramienta (Carballo-Penela 2010) con el principal objetivo de convertirla en una herramienta válida para el ecoetiquetado de bienes y servicios. En esta versión, el *libro de cálculo* lo conforman un total de 20 *hojas de cálculo*. La principal hoja de cálculo es la denominada *HC* cuyo contenido se divide en 6 grupos de columnas que reflejan: 1) los diferentes epígrafes, capítulos y categorías de consumo en las que se agrupan los bienes, servicios, residuos y usos de suelo considerados; 2) los consumos anuales efectuados por la empresa estudiada; 3) los factores de emisión necesarios para transformar los bienes, servicios y residuos en GEI; 4) la Huella por tipo de ecosistema; 5) la Huella total; y 6) la Contrahuella. La estructura de esta hoja de cálculo se presenta en la Tabla 1.3. Las filas muestran la Huella de los inventarios realizados, mientras que las columnas de la matriz incluyen los factores de emisión, transformación, conversión y equivalencia –ver el glosario incluido en Global Footprint Network (2014)–. El cálculo de la HC y la Huella Ecológica se realizan desde el apoyo de bases de datos y operaciones presentes en el resto hojas de cálculo. Para más detalle consultar Carballo-Penela (2010) o descargar la herramienta en www.huellaecologica.com.



Tabla 1.3: Resumen de las categorías de consumo y columnas presente en la principal hoja de cálculo del MC3 v 2.0

Categoría de Consumo	Consumo anual					Factores de emisión		Huella por tipo de ecosistema						Huella Total	Contra-huella
	Unidades consumo ud.·año ⁻¹	Euros sin IVA €·año ⁻¹	Toneladas t·año ⁻¹	Intensidad energética GJ·t ⁻¹	Energía GJ·año ⁻¹			Energía fósil tCO ₂	Tierra cultivable tCO ₂	Pastos tCO ₂	Bosques tCO ₂	Terreno Construido tCO ₂	Mar tCO ₂	tCO ₂	tCO ₂
1. Combustibles															
2. Otros															
3. Electricidad															
4. Materiales															
5. Servicios y Contratas															
6. Productos Agrícolas y Pesqueros															
7. Productos Forestales															
8. Agua															
9. Uso de Suelo															
10. Residuos, Vertidos y Emisiones															



Desde el año 2011, el proyecto colaborativo CarbonFeel toma la riendas de los avances metodológicos realizados en el MC3. CarbonFeel es una iniciativa abierta a cualquier organismo interesado en el cálculo y semántica de la HC. El objetivo del proyecto es establecer una plataforma para la búsqueda de acuerdos entre organizaciones (incluyendo universidades, certificadoras, empresas e instituciones) con los que proporcionar soluciones a los procesos de cálculo, verificación, certificación y etiquetado de la HC. En esta plataforma se pretende, por un lado, la estandarización de una metodología de cálculo de la HC para organizaciones y productos que cumpla con las normas internacionales existentes; y, por otro lado, poner a disposición de la sociedad un etiquetado de la HC accesible, transparente y comparable que permita la incorporación de las nuevas tecnologías para alcanzar la inmersión social.

Desde el 2011 Carbonfeel desarrolla un profundo análisis del MC3, lanzando en enero de 2012 una nueva versión denominada Carbonfeel MC3 12.0. Esta versión cuenta con un total de 50 mejoras sustanciales entre las que destacan la incorporación de 6 hojas de cálculo al método. Estas nuevas hojas tratan de manera específica los factores de emisión, la HC según estándar GHG Protocol, la HC de producto, la Huella Ecológica de producto, la Huella Ecológica medida en ha y una serie de gráficos resumen. El detalle gráfico de su hoja principal puede verse en la Figura 1.14.



Capítulo 1. Introducción

<

Figura 1.14: Detalle gráfico del libro de cálculo Carbonfeel MC3 12.0

Durante el año 2012 los esfuerzos se centraron en inventariar todas las entradas de datos, factores, patrones de cálculo e indicadores, a fin de permitir trabajar con mayor rigor y desarrollar las posibilidades de configuración con otros sistemas y lenguajes de cálculo. De esta manera se lanza en Enero de 2013 la versión denominada Bookfeel 13.0 con importantes mejoras entre las que se destaca la actualización de sus patrones de cálculo ampliando las tipologías de obras a más de 100 diferentes. Esta versión además tiene la ventaja de permitir la adaptación de la herramienta a diferentes escenarios territoriales y sectoriales. Como contrapartida el libro de cálculo crece en complejidad, dado que se generan un total de 80 hojas de cálculo y se desarrollan macros y módulos de función programados. Estos avances desarrollados comienzan a dar sus frutos solucionando una de las mayores debilidades atribuidas al método, la falta de experiencias para diferentes ámbitos internacionales. La herramienta MC3 en su versión Bookfeel 13.0 inicia esta internacionalización describiéndose experiencias en Chile, Bolivia, Ecuador, Perú y Brasil. El detalle gráfico de su hoja principal puede verse en la Figura 1.15.



The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'BookFeel 2013-01-ES-0000000000-01-C DRAFT - Microsoft Excel'. The spreadsheet is titled 'Huella de carbono corporativa GHG Protocol'. It contains a table with columns for 'Calcula Carbonfeel', 'Borrar Entrada', 'HUELLA DE CARBONO NETA [tCO2]', and 'INFORMACION ADICIONAL'. The table lists various emission categories (e.g., 0011 Emisiones directas por combustión estacionaria, 0012 Emisiones directas por combustión con transporte propio, etc.) and their corresponding values in the 'ALCANCE 1', 'ALCANCE 2', and 'ALCANCE 3' columns. The bottom row shows the 'Total [tCO2]'.

	Calcula Carbonfeel	Borrar Entrada	HUELLA DE CARBONO NETA [tCO2]			INFORMACION ADICIONAL
			ALCANCE 1	ALCANCE 2	ALCANCE 3	
6	0011 Emisiones directas por combustión estacionaria					
7	0012 Emisiones directas por combustión con transporte propio					
8	0013 Otras emisiones directas					
9	0014 Combustión otros gases GEI Protocolo Kioto					
10	0015 Consumo de electricidad					
11	0016 Combustión otros gases GEI Protocolo Kioto					
12	0017 Ciclo de vida combustibles y biocombustibles					
13	0018 Ciclo de vida electricidad					
14	0019 Consumo de materiales no orgánicos					
15	0020 Consumo de servicios y contratas					
16	0021 Consumo de recursos agropecuarios y pesqueros					
17	0022 Consumo de recursos forestales					
18	0023 Consumo de agua					
19	0024 Usos del suelo					
20	0025 Residuos no peligrosos					
21	0026 Residuos peligrosos					
22	0027 Residuos radiactivos					
23	0028 Vertidos en el agua					
24	0029 Emisiones otros gases GEI Protocolo Kioto					
25	0030 Combustibles (Combustión biocombustibles)					
26	0031 Otros gases GEI Protocolo Kioto (Combustión biocombustibles)					
27	Total [tCO2]					

Figura 1.15: Detalle gráfico del libro de cálculo BookFeel 13.0

Recientemente (Marzo de 2014) se ha publicado la versión Bookfeel 25 con nuevas funcionalidades de configuración por la incorporación de las directrices y principales herramientas desarrolladas en torno la iniciativa denominada en inglés "*Global Protocol for Community-Scale GHG (GPC)*" (WRI et al. 2014). Por tanto la herramienta gana en su capacidad de adaptación a municipios. Otro avance es la generación rápida de informes y gráficos por parte del propio usuario. A través de la plataforma Carbonfeel se comparte una versión de prueba (gratuita para uso no comercial) que permite el cálculo con más de 500 capítulos de consumo y con la evaluación del impacto en tCO₂e de hasta 16 categorías de GEI y contaminantes. Estas últimas mejoras en la herramienta Bookfeel 25 han permitido la generación automática de los principales informes solicitados por Programas de Comunicación nacionales e internacionales. En concreto destaca en el ámbito internacional la generación automática del informe para el mencionado "*Global Protocol for Community-Scale GHG (GPC)*" y en el ámbito nacional destaca la solicitud/actualización de datos en el Registro de Huella de Carbono, compensación y proyectos de absorción de acuerdo al RD 163/2014 promovido por la



Oficina Española de Cambio Climático.

SOLICITUD DE INSCRIPCIÓN/ACTUALIZACIÓN DE DATOS EN EL REGISTRO DE HUELLA DE CARBONO, COMPENSACIÓN Y PROYECTOS DE ABSORCIÓN			
Sección de huella de carbono y compromiso de reducción GEI			
En caso de solicitar la actualización de datos en el registro, indique el código de identificación que le fue asignado e indique brevemente el motivo de la solicitud de actualización. Cumplimente únicamente los datos a actualizar.			
Código:	Motivo :		
IDENTIFICACIÓN DE LA ORGANIZACIÓN			
Nombre:			
Sector / Actividad :			
Tamaño de la entidad (en base a la Recomendación 2003/361/CE de la Comisión (Diario Oficial L124 de 20.5.2003):			
<input type="checkbox"/> Micro <input type="checkbox"/> Pequeña <input type="checkbox"/> Mediana <input type="checkbox"/> Otros			
Razón social:		CIF /NIF	
Domicilio:			
C.P.:	Municipio:	Provincia:	
Persona de contacto:			
Teléfono:	Fax:	E-mail:	
DATOS A EFECTO DE NOTIFICACIÓN (Cumplimentar en caso de tratarse de datos distintos a los incluidos en el apartado anterior)			
Domicilio:			
C.P.:	Municipio:	Provincia:	
Persona de contacto:			
Teléfono:	Fax:	E-mail:	
HUELLA DE CARBONO			
Límites considerados para los cálculos			
Temporal:			
Límites de la organización: Enfoque de consolidación			
<input type="checkbox"/> Participación accionaria <input type="checkbox"/> Control			
Límites operativos: Alcances			
<input type="checkbox"/> Alcance 1+2			
<input type="checkbox"/> Alcance 3			
Cálculo:			
<input type="checkbox"/> Hoja de cálculo MAGRAMA <input checked="" type="checkbox"/> Otras			
En caso de "Otras" indique cuál: BookFeel de la Iniciativa CarbonFeel www.carbonfeel.org			
Resultados huella de carbono (t CO ₂ eq):			
Huella de carbono TOTAL: 0,00			
Alcance 1: 0,00 Alcance 2: 0,00 Alcance 3: 0,00			
Índice de actividad (unidad funcional a propuesta de la organización):			
Ratio de emisiones (t CO ₂ eq / unidad funcional): 0,00000 Unidades :			
Alcance 1: 0,00 Alcance 2: 0,00 Alcance 3: 0,00			
VERIFICACIÓN			
Indique si la huella de carbono ha sido verificada: <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/> No			
En caso afirmativo indique:			
Entidad acreditada:			
Norma / estándar que acredita a la entidad:			
Periodo de validez de la certificación/año de la verificación:			

Figura 1.16: Detalle gráfico de plantilla generada automáticamente por la herramienta Bookfeel 25.

OBJETIVOS



1. Objetivo General

El objetivo de esta investigación es evaluar el MC3 como herramienta de cálculo de la HC válida tanto para organización como para producto. En este sentido se pretenden desarrollar avances metodológicos que faciliten la internacionalización y coherencia con los estándares internacionales de la HC (ISO/TS 14067 e ISO/TR 14069).

2. Objetivos Específicos

El objetivo general será abordado de acuerdo con los siguientes objetivos específicos:

- a. Analizar el estado del arte en lo relacionado al indicador HC.
- b. Analizar las principales propuestas metodológicas para el cálculo de la HC.
- c. Desarrollar aplicaciones innovadoras en base al MC3.
- d. Desarrollar aplicaciones innovadoras en base a la Extensión Ambiental del Análisis Input-Output.
- e. Desarrollar un análisis de fortalezas y estrategias relativas al MC3.

Los objetivos específicos *a* y *b* son abordados en el capítulo de la Introducción. Los objetivos específicos *c* y *d* son desarrollados en los correspondientes capítulos de Resultados y Casos de Estudio. El objetivo específico *e* es detallado en los capítulos de Discusión y Conclusiones.



3. Descripción y justificación de los capítulos

3.1. Introducción

En este primer capítulo se realiza una presentación de las cuestiones más relevantes relacionadas con el Cambio Global y el Desarrollo Sostenible. Se comprende el interés en analizar con detalle el indicador HC, desde su origen hasta las actuales propuestas metodologías más relevantes. Asimismo, se presentan y caracterizan las propuestas de Análisis Híbridos y el MC3.

3.2. Materiales y Métodos

En este capítulo se detalla la base teórica y práctica de los principales avances metodológicos en la Extensión Ambiental del Análisis MRIO así como el ACV. A continuación se explicita la base metodológica y los procesos de cálculo del MC3. Finalmente se presentan los recientes estándares internacionales de la HC (ISO/TS 14067 e ISO/TR 14069).

3.3. Resultados

En este capítulo se analizan pormenorizadamente 4 casos de estudios con características innovadoras. Tres de ellos relativos al empleo del MC3 en tres diferentes unidades de estudio: organización, producto y escenario internacional (casos de estudio 1, 2 y 3 respectivamente). Por último, el caso de estudio 4 se basa en la Extensión Ambiental del Análisis MRIO. El capítulo se ha redactado en inglés a fin de aportar los manuscritos que ya han sido publicados o están bajo revisión en revistas de reconocido prestigio e incluidas en el catálogo *“Journal Citation Reports”*.

A continuación se presentan los principales aspectos innovadores de los



diferentes estudios desarrollados.

a. Huella de Carbono usando el Método de Compuesto de las Cuentas Contables. El caso de la Escuela de Ingeniería de Montes, Universidad Politécnica de Madrid

Los avances desarrollados en la versión 2.0 del MC3 se aplican con el objetivo de evaluar el MC3 como herramienta de cálculo de la HC válida para organizaciones. Para ello se ha empleado el escenario de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes que, además de ser ampliamente conocido por los autores, es un ámbito de estudio (el universitario) tradicionalmente abierto a la experimentación de métodos diversos como los de la evaluación de la sostenibilidad. Los resultados permiten valorar el MC3 como método de cálculo de la HC práctico y que evalúa correctamente la cantidad de emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero. Es más, el cálculo de la HC proporciona una base analítica para la ejecución de planes de gestión del carbono.

b. Método Compuesto de las Cuentas Contables frente al Análisis del Ciclo de Vida por Procesos en Huella de Carbono de Producto: Una comparación utilizando la Paleta de Madera

La divergencia metodológica organización-producto (ya abordada en el apartado 2.1 de la Introducción) genera una falta de consistencia sobre el concepto de la HC. El MC3 es capaz de hacer frente a esta circunstancia siendo válida su aplicación tanto para organizaciones como para productos. En este caso de estudio se implementan los avances desarrollados en el Proyecto Carbonfeel (versión 12.3 del MC3) con el objetivo de evaluar su aplicación a productos. Para ello se ha tomado como objeto de estudio la paleta de madera, realizando tanto la aplicación del MC3



como un Análisis de Procesos sobre el ACV parcial (es decir, *de la cuna a la puerta*).

Los resultados se comparan poniendo en valor las fortalezas y debilidades del MC3.

c. Huella de Carbono usando el Método Compuesto de las Cuentas Contables. El caso de los Parques Eólicos de Osorio

Uno de los grandes retos del MC3 ha sido su internacionalización (ver apartado 2.4.5 de la Introducción). En este caso de estudio, se reúne la experiencia acumulada y se desarrolla la adaptación del MC3 al escenario brasileño. En concreto se han aplicado las versiones brasileña y española (BookFeel.076.0000.BRL.00 y BookFeel.724.0000.EUR.00) para calcular la HC de los Parques Eólicos de Osorio (Brasil). Este gran complejo de aerogeneradores, uno de los mayores del mundo, tiene asociados grandes cantidades de consumos que se reparten tanto espacial como temporalmente (25 años de ciclo de vida). Los resultados ponen en valor la capacidad del MC3 de incorporar fuentes de emisión nunca descritas con anterioridad para la energía eólica. MC3 muestra ser una herramienta consistente y válida para grandes proyectos de ingeniería civil de compañías internacionales.

d. Análisis Multi-Region Input-Output. Emisiones asociadas al comercio internacional y al aislamiento de economías

La extensión ambiental del Análisis MRIO se plantea como una herramienta de gran capacidad para responder a las necesidades metodológicas del indicador HC. En este capítulo se realiza una innovadora aplicación a fin de estudiar el efecto de un hipotético aislamiento internacional de las economías. Los resultados ofrecen conclusiones que pueden justificar la implementación de tasas verdes sobre el



comercio internacional. El estudio refuerza aún más la necesidad de elaborar inventarios de GEI basados en el consumo y pone en valor las técnicas de Extensión Ambiental del Análisis MRIO.

3.4. Discusión

En este capítulo se analizan los estudios desarrollados a fin de poner en valor las fortalezas de las innovaciones implementadas con un sentido global e integrador de los diferentes casos. También se proponen estrategias futuras que permitan mejorar la propuesta metodológica del MC3 con el punto de mira puesto en la internacionalización y la armonización con los estándares internacionales de HC.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se enumeran de forma breve y concisa las conclusiones derivadas del trabajo desarrollado.

MATERIALES Y MÉTODOS



1. Huella de Carbono y Análisis de Ciclo de Vida

Ya se ha señalado que el ACV proporciona un enfoque “*bottom-up*” válido para el cálculo de la HC de producto. La metodología de ACV consiste en la “recopilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un sistema producto durante su ciclo de vida” (ISO 14040:2006). Esta metodología describe y analiza los flujos que entran desde la *naturaleza* al *sistema* estudiado y los que salen del *sistema* a la *naturaleza*, para diferentes procesos descritos. Este análisis se realiza por medio de un *mapa de procesos* o un *diagrama de flujo* donde se representan las operaciones e impactos ambientales asociadas (ISO 2006).

1.1. Características del Análisis de Ciclo de Vida

El ACV es una herramienta adecuada para: (1) identificar las oportunidades de reducción bien de los impactos ambientales, o bien de los consumos energéticos y de los materiales en un producto, o en un proceso, dentro de las distintas etapas de su ciclo de vida; (2) proporcionar información a los responsables de la toma de decisiones, tanto a nivel público como privado, en relación a la repercusión medioambiental de sus decisiones; y (3) mejorar el posicionamiento en el mercado de determinados bienes y servicios mediante la difusión de los beneficios ambientales que llevan asociados.

La característica principal de los ACV reside, como su propio nombre indica, en la inclusión de todas las etapas del producto o servicio a analizar, normalmente desde la cuna (extracción de materias primas) hasta la tumba (fin de vida). De acuerdo con

la estandarización ISO 14040, se distinguen cuatro fases en un estudio de ACV: (1) definición del objetivo y del alcance del estudio, (2) Análisis del inventario, (3) Evaluación de impacto e (4) Interpretación. La relación existente se presenta en la Figura 3.1. Estas fases incluyen la definición clara del alcance y reglas a seguir (límites, asignación, calidad del dato, etc), así como la elaboración de un inventario exhaustivo con todos los procesos, materiales y energía que intervienen en el servicio o producto a analizar. Por último se realiza una evaluación de los potenciales impactos ambientales así como una interpretación final del conjunto de resultados.

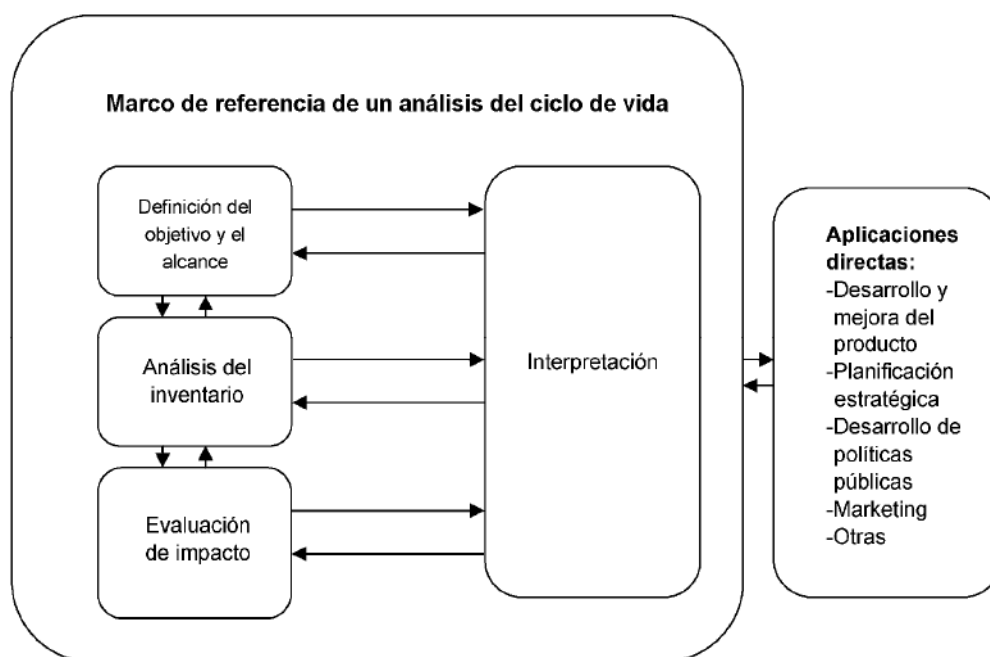


Figura 3.1: Etapas de un Análisis del Ciclo de Vida (ISO 2006)

1.2. Técnicas de Análisis de Procesos y Análisis de Proyección

La técnica tradicionalmente empleada para la elaboración del ACV es la denominada Análisis de Procesos, cuya finalidad es de obtener datos primarios, es



decir, datos específicos del proceso en estudio. Los datos primarios se clasifican en: (1) datos de actividad de proceso (medidas físicas de un proceso que da lugar a emisiones o absorciones de GEI); (2) datos de emisiones directas (medidas físicas determinadas mediante la supervisión directa del proceso aplicando estequiometría, equilibrio de masas, o métodos similares); y (3) datos derivados de la asociación con un proceso común ya analizado (WRI y WBCSD 2011). En la práctica también se obtiene datos primarios mediante la aplicación de modelos, siempre y cuando se cumpla que la modelización es realizada de manera específica para el proceso en estudio.

Realizar un estudio de ACV únicamente mediante datos primarios resulta altamente costoso para el analista. Es por ello que, en la mayoría de los trabajos, se combinan datos primarios con datos secundarios obtenidos mediante la técnica denominada Análisis de Proyección (en inglés, *“screening”*). Los datos secundarios son aquellos que no provienen de procesos específicos del ciclo de vida del producto estudiado. Es decir, que provienen de fuentes externas (por ejemplo, bases de datos de ciclos de vida, asociaciones industriales, etc.), o incluso pueden ser datos de otro proceso o actividad relacionada. Así, los datos de la actividad financiera se consideran como fuente de datos secundarios (WRI y WBCSD 2011).

La mayoría de los ACV combinan las técnicas de Análisis de Procesos y Análisis de Proyección. Ambas técnicas de ACV se definen como *“bottom-up”*, dado que permiten obtener resultados finales mediante la acumulación de datos con alto nivel de detalle y de gran precisión (van Vuuren et al. 2009). En función del estándar de normalización, o programa de comunicación al que se quiera optar, hay requisitos



que limitan el empleo de datos secundarios. Por ejemplo, el estándar “*Product GHG Protocol*” establece que las empresas deberán recoger datos primarios para todos los procesos bajo su propiedad o control y por tanto generen emisiones directas (WRI y WBCSD 2011).

1.3. Herramientas y bases de datos

Además de las técnicas de Análisis de Procesos y Análisis de Proyección, existen un gran número de herramientas y bases de datos que facilitan el desarrollo de los ACV. Entre las herramientas más conocidas se pueden citar SimaPro (de Pré Consultants, Amersfoort, Países Bajos), GaBi (de Pe International, Leinfelden-Echterdingen, Alemania) y Umberto (de Ifu Hamburg, Hamburg, Alemania), todas ellas comercializadas. Otras herramientas menos conocidas, de libre uso pero más restringidas a un sector determinado son GEMIS (de Plastics Europe) y EIO-LCA (de Carnegie Mellon University) (González Berzosa 2013).

Las bases de datos suelen estar incluidas en los paquetes de instalación de las herramientas. Tal y como se puede observar en la Tabla 1.3, sus características son muy diferentes en función del método de análisis empleado en su confección, de la licencia, del año de referencia, de su localización, del número de procesos abarcados, etc. La mayor parte de las bases de datos usan estudios implementados en países desarrollados. Dentro del ámbito europeo abundan los estudios suizos, ingleses, holandeses, alemanes y suecos que son los entornos geográficos donde el ACV ha tenido mayor auge (GHG Protocol 2014).



2. Huella de Carbono y Extensión Ambiental del Análisis Input-Output

Ya se ha señalado que la Extensión Ambiental del Análisis Input-Output proporciona un enfoque “*top-down*” válido para el cálculo de la HC (Wiedmann et al. 2007); y por otro lado, las tablas MRIO son capaces de reflejar las transferencias existentes entre sectores económicos de diferentes territorios. La combinación de ambos métodos permite el cálculo de la HC relacionando los sistemas productivos de los territorios bajo análisis.

Esta propuesta metodológica constituye un recurso fundamental para el cálculo de la HC a nivel de organizaciones y territorios. Su principal ventaja es la de ser capaz de vincular la demanda, o consumo final, con la actividad productiva inducida (tanto directa como indirecta). Esta operación se realiza determinando los inputs intermedios necesarios para satisfacer la demanda mencionada o consumo final. La gran virtud del desarrollo de las tablas MRIO es que permite determinar la actividad productiva siguiendo el rastro de la localización.

2.1. Técnica de Análisis Input-Output

El Análisis Input-Output se basa en tablas simétricas Input-Output, que son un conjunto de ecuaciones que describen el flujo de bienes y servicios entre los distintos sectores de una economía en un período determinado. Estas tablas se pueden expresar en forma matricial, de la siguiente forma:

$$X = Z + Y \quad (1)$$



Siendo:

X : vector de producción total de la economía, donde cada elemento x_i del vector X representa la producción total del sector i .

Z : matriz simétrica de la economía, donde el elemento z_{ij} de esta matriz representa la cantidad de inputs procedentes del sector i que utiliza el sector j en su proceso productivo.

Y : matriz de demanda final de la economía, donde cada elemento y_{ik} representa la cantidad del bien producido por el sector i demandada por el componente k de la demanda final.

El modelo básico de Leontief (1936) es una transformación de la ecuación (1) que establece cuál es la producción total necesaria de una economía para satisfacer un determinado nivel de demanda final:

$$X = (I - A)^{-1}Y \quad (2)$$

Siendo:

X : véase ecuación (1).

I : matriz identidad.

A : matriz de coeficientes técnicos, cuyos componentes $a_{ij} = x_{ij}/x_j$ representan la cantidad de producción del sector i necesaria para incrementar la producción de la rama de actividad j en una unidad.

Y : véase ecuación (1).



Partiendo de las emisiones de GEI de cada rama de actividad (sector productivo) definida en la tabla Input-Output, es posible establecer ratios de emisiones directa por unidad de producción (intensidad directa o intensidad de emisión). Sean e_i las emisiones de GEI del sector i , definimos la intensidad directa como $c_i = e_i/x_i$. La intensidad directa de cada una de los sectores productivos de la economía vendría recogida en el vector C .

De la propia definición de intensidad de emisiones, multiplicando la matriz diagonalizada de ésta por el nivel de producción, obtenemos las emisiones de los sectores productivos:

$$CX = E \quad (3)$$

Siendo:

C : matriz cuadrada diagonal de intensidades directas, cuyos componentes c_{ii} representan la cantidad de emisiones directas del sector i por unidad de producción.

X : véase ecuación (1).

E : matriz de emisiones totales, cuyos componentes e_{ij} representan las emisiones de GEI del sector j producidas por la demanda en el sector i .

De la ecuación de Leontief (2) y de la ecuación (3), tenemos que las emisiones asociadas a la demanda final de bienes producidos son:

$$E = C(I - A)^{-1}Y \quad (4)$$

E : véase ecuación (4).



C: véase ecuación (3).

I: véase ecuación (2).

A: véase ecuación (2).

Y: véase ecuación (1).

Esta metodología ha sido utilizada para el estudio de las emisiones contenidas en el consumo y en el comercio exterior de un gran número de regiones y países. El desarrollo de los modelos MRIO ha facilitado el cálculo de emisiones asociadas a las exportaciones e importaciones de cada país. Para desarrollar estos cálculos, se hace necesario distinguir en la matriz *Y* las columnas y filas correspondientes al consumo doméstico y asociado al comercio internacional.

Para más detalle consultar el apartado de materiales y métodos presente en el caso de estudio 4 del capítulo de Resultados.

2.2. Técnica para determinación del efecto multiplicador

Una de las principales debilidades del indicador HC es la dificultad para la determinación de los límites del sistema (Capítulo Introducción, apartado 5.1.). El Análisis Input-Output permite dar solución a esta circunstancia por medio del *efecto multiplicador*. El desarrollo matemático de Leontief (1936) permite estimar los efectos que cualquier cambio en la demanda de bienes y servicios producen sobre el resto de las ramas de actividad, pues los sectores que satisfacen directamente esa demanda deben a su vez ser abastecidos por otros sectores, éstos por otros y así sucesivamente. Esta propagación, conocida con el nombre de efecto multiplicador, permite valorar el incremento de emisiones producido por un incremento externo



en el consumo, en la inversión o en el gasto público.

Sin embargo, para poder calcular el efecto multiplicador, es necesario distinguir entre (1) Efecto directo –demanda directa– y (2) Efecto indirecto –requerimiento indirecto de inputs para satisfacer esa demanda–.

El efecto multiplicador es el ratio entre los efectos totales (directo e indirecto) y el efecto directo. Si se toma la Ecuación 2 y se desarrolla la inversa de Leontief, se obtiene (Hendrickson et al. 2006; Miller y Blair 2009):

$$X = (I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^n)Y = \sum_{i=0}^{\infty} Y A^i \quad (5)$$

Siendo:

X : véase ecuación (1).

I : véase ecuación (2).

A : véase ecuación (2).

Y : véase ecuación (1).

Esta serie de potencias es comúnmente utilizada en el Análisis Input-Output como una vía para interpretar la inversa de Leontief (Peters 2006). El número i en la ecuación 5 representa el nivel de capa (en inglés “*layer*”). La capa de producción 0 se identifica con las necesidades directas, propiamente derivadas de la actividad. Según aumenta el coeficiente i se incorporan nuevas capas de necesidades indirectas derivadas de la necesidad directa. Por lo tanto, esta infinita serie de potencias permite localizar las emisiones indirectas a lo largo de la cadena de suministro y así



establecer correctamente los límites del sistema.

2.3. Herramientas y bases de datos

Las operaciones con tablas MRIO requieren de soluciones informáticas válidas para el análisis matricial. En la presente investigación se ha utilizado la herramienta de software matemático MATLAB® por su capacidad en la manipulación de matrices.

En relación a las bases de datos, cabe destacar el gran número de trabajos desarrollados en los últimos años que han tenido como resultado la elaboración de tablas MRIO (Peters et al. 2011). Entre todos los esfuerzos, la última versión de GTAP 8 (Narayanan et al. 2012), así como las nuevas tablas WIOD (Timmer 2012) y EORA (Lenzen et al. 2012; Lenzen et al. 2013). En la Tabla 3.1 se resumen las principales características de este conjunto de tablas globales MRIO. Muchas de estas tablas se publican para diferentes años de referencia por lo que permiten el desarrollo de técnicas avanzadas de Análisis MRIO como el Análisis de Equilibrio General (Miller y Blair 2009).



Tabla 3.1: Resumen de las características clave de las principales tablas globales Multi-Región Input-Output. UE: Unión Europea. RdM: Resto del Mundo

Tabla	Años de referencia	Regiones	Sectores	Extensión ambiental	Lanzamiento	Financiación
GTAP 9	2004 2007 2010 2011	129	57 sectores	Emisiones al aire, biocombustibles, agua, energía, uso de suelo.	Marzo 2014	Consortio coordinado por la Universidad de Purdue (Estados Unidos)
WIOD	1995-2011 (anual)	27 UE, 13 otros y RdM	35 industrias y 59 productos	Energía (26), emisiones al aire (10), materiales (24), uso de suelo (4), agua (3)	Noviembre 2013	7º Programa Marco para la investigación en la Unión Europea. Coordinado por Universidad de Groningen (Holanda)
EORA	1990-2011 (anual)	187	25 sectores armonizados. 85 sectores por región de media	35 indicadores desde 2010	Noviembre 2013	Consejo Australiano de Investigación. Coordinador por la Universidad de Sydney (Australia)

3. Método Compuesto de las Cuentas Contables

La investigación llevada a cabo en esta tesis parte del desarrollo científico y técnico presente en el MC3. A continuación se describen los detalles metodológicos de esta herramienta para el cálculo de la HC. Con este fin, se explicitan los aspectos relacionados con fuentes de información y con los procedimientos de cálculo. Las fases para la ejecución de un proyecto basado en el MC3 se describen en el Anexo I.

3.1. Fuentes de información



3.1.1. Normas y estándares de referencia

Como ya ha sido mencionado, una de las principales ventajas del MC3 es la capacidad para el cálculo de la HC de organización y la HC de producto bajo un mismo enfoque de cálculo, el denominado enfoque integrado (ver apartado 2.4. de la introducción). Así mismo, el MC3 busca ser coherente con las principales normas relacionadas con la HC como son las normas ISO 14064 (Gases de efecto invernadero), ISO 14040 (Evaluación del ciclo de vida - Principios y marco de referencia), ISO 14044 (Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices) y ISO 14025 (relativa a ecoetiquetados tipo 3 y declaraciones ambientales). Dada esta base conceptual del MC3, se considera que las recientes publicaciones de la especificación técnica ISO/TS 14067 (HC de producto) e informe técnico ISO/TR 14069 (Guía para la aplicación ISO 14064-1) también pueden ser incorporadas dentro de la normativa de referencia o por lo menos incorporar aquellas cuestiones que hayan sido de nuevo definidas. Sin embargo, aún no se encuentra ningún trabajo realizado en base al método que haya sido certificado por estas últimas referencias. Dada la importancia de estos últimos estándares, son presentados en detalle en el apartado 4 del presente capítulo.

3.1.2. Fuentes de información para inventarios

El método precisa de, al menos, tres inventarios anuales denominados bajo el nombre de: Consumos, Suelos y Residuos. En concreto consiste en (1) el análisis de la contabilidad anual de gastos e inversiones, (2) los residuos y vertidos peligrosos y no peligrosos que han sido generados y (3) el uso de suelo bajo control o propiedad. Adicionalmente a estos inventarios se pueden realizar otros inventarios que den



respuesta a consideraciones comúnmente no tenidas en cuenta en los estudios de la HC; como por ejemplo, el almacenamiento de carbono biogénico.

Dentro de estos inventarios, la fuente de información más importante del método es el cierre anual de la contabilidad de gastos e inversiones. Esta es la razón por la que el método recibe el nombre de MC3. Esto no quiere decir que la única información que se utilice sea de tipo económico, ya que, en ocasiones, bien por falta de datos o bien cumplimiento normativa, se emplean también unidades físicas (toneladas, litros, hectáreas) y energéticas (GJ, KWh).

3.2. Procedimiento de cálculo

El método dispone en su herramienta de cálculo de las distintas fórmulas necesarias para realizar las conversiones de unidades de entrada (principalmente euros) a toneladas de CO₂e. Además existir la posibilidad de trabajar con unidades económicas, el método permite introducir unidades físicas y energéticas en todas las categorías presentes para el análisis del alcance 3 (para ver definición de alcance 3, ver apartado 4.2 del presente capítulo).

A continuación se detalla el procedimiento de cálculo en función del inventario. Este análisis se podría haber hecho en función de los 9 capítulos o epígrafes del método: (1) Combustibles, (2) Electricidad, (3) Materiaes no organicos, (4) Servicios y Contratas, (5) Recursos agrícolas y pesqueros, (6) Recursos forestales, (7) Agúa, (8) Usos de suelo y (9) Residuos y Vertidos. Para ver este análisis por capítulos consultar (Cagiao et al. 2011; Carballo-Penela, 2010).



3.2.1. Inventario de usos de suelo

El MC3 se desarrolla en una herramienta que contempla los siguientes usos para el suelo (Tabla 3.2), los cuales se recogen en el capítulo 8 “Usos del suelo”.

Tabla 3.2: Inventario de usos del suelo, herramienta CarbonFeel MC3

Categoría	Unidades
8. Usos del suelo	
8.1. Sobre tierra firme	
. Zonas de cultivos	ha
. Zonas de pastos o jardines	ha
. Zonas de arbolado	ha
. Construido, asfaltado, erosionado, etc.	ha
. Acuicultura	ha
8.2. Sobre agua	
. Rellenos utilizados para cultivos	ha
. Rellenos utilizados para pastos o jardines	ha
. Rellenos utilizados para bosque o arbolado	ha
. Rellenos para muelles, pistas, etc.	ha
. Usos acuáticos, pesca (sin acuicultura)	ha
. Acuicultura en mar	ha

Una vez recogida la cantidad de superficie que se tiene bajo control, se clasifica cada suelo según los usos del suelo mencionados y la herramienta procede a calcular la HC en toneladas de CO₂e multiplicando la superficie por el factor de absorción (tCO₂e·ha⁻¹) de cada suelo.

En áreas de superficie forestal, Wackernagel y Rees (1996) emplearon inicialmente un factor de absorción de 1,8 tC·ha⁻¹·año⁻¹, lo cual para la proporción carbono-oxígeno presente en la molécula de CO₂ (12:44) equivale a 6,6 tCO₂e·ha⁻¹·año⁻¹. Con posterioridad se ha empleado un factor de absorción de 1,42 tC·ha⁻¹·año⁻¹ ó 5,2 tCO₂e·ha⁻¹·año⁻¹ (IPCC 1996). Y las estimaciones más recientes asumidas por el IPCC (2007) reconocen una tasa de absorción de 1 tC·ha⁻¹·año⁻¹ ó 3,67 tCO₂e·ha⁻¹·año⁻¹ obtenida del trabajo de El Bouazzaoui (2007).



Para las áreas de cultivo se utiliza el factor $1,98 \text{ tCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ publicado por el Grupo de Trabajo sobre Sumideros y Agricultura del Programa Europeo sobre Cambio Climático ECCP (2004). Para las superficies pasto y jardines, se emplea el valor promedio $0,23 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ó $0,84 \text{ tCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ (Flanagan et al. 2002; Soussana et al. 2004). Finalmente, en relación con la superficie de agua marina se asumen los factores de absorción $0,24 \text{ tCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ publicados por Sabine et al. (2004) y citado en el 4º informe de evaluación (IPCC 2007).

3.2.2. Inventario de residuos

La herramienta MC3 contempla los tipos de residuos y vertidos descritos en la Tabla 3.3. Cada uno de ellos tiene una carga de emisiones diferente, en función de los distintos tratamientos que se aplican en la gestión. La transformación a tCO_2e se realiza mediante factores de emisión ofrecidos por dos fuentes. Por un lado, el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino ofrece factores para los Residuos Sólidos Urbanos y asimilables en función del tratamiento, publicados en la herramienta de cálculo de la HC para aquellos municipios dentro de la Red Española de Ciudades por el Clima (FEMP 2014). Por otro lado, la Universidad de Oviedo (Marañón et al. 2008) publica factores que consideran la superficie biológicamente productiva necesaria para la gestión de los residuos y vertidos.



Tabla 3.3: Inventario de residuos, herramienta Carbonfeel MC3. RSU: Residuo Sólido Urbano; EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales.

Categoría	Unidades
9. Residuos, vertidos y emisiones	
9.1. Residuos no peligrosos	
. RSU y asimilables (vertedero tradicional)	t
. RSU y asimilables (incineración)	t
. RSU y asimilables (vertedero con recuperación)	t
. RSU y asimilables (generación de biogás)	t
. Orgánicos (alimentos)	t
. Papel y cartón	t
. Envases ligeros (plástico, latas, brik)	t
. Vidrio	t
. Residuos de construcción y demolición	t
9.2. Residuos peligrosos	
. Aceites usados	t
. Emulsiones agua/aceite	t
. Ácidos alcalinos o salinos	t
. Sanitarios y Material Específico de Riesgo	t
. Filtros de aceite	t
. Absorbentes usados	t
. Pinturas, barnices, alquitranes, químicos	t
. Pilas	t
. Disolventes	t
. Taladrinas	t
. Baterías	t
. Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos	t
. Envases contaminados (incluye metálicos)	t
. Vertidos a red (con EDAR al mar)	m ³
. Vertidos a red (con EDAR a río)	m ³
. Vertidos al mar con autorización	m ³

3.2.3. Inventario de consumos

El inventario de consumos es el más extenso de los tres que precisa la herramienta del MC3. En la Tabla AII.1 del Anexo II se recogen todos los apartados y consumos que contempla. Para convertir los consumos en unidades de CO₂e, se multiplican por diferentes factores transformación, emisión y absorción en función de

la categoría a la que pertenezca. La Figura 3.2 ofrece un esquema del proceso de cálculo más complejo presente para aquellos consumos de materiales agrícolas, pesqueros y forestales.

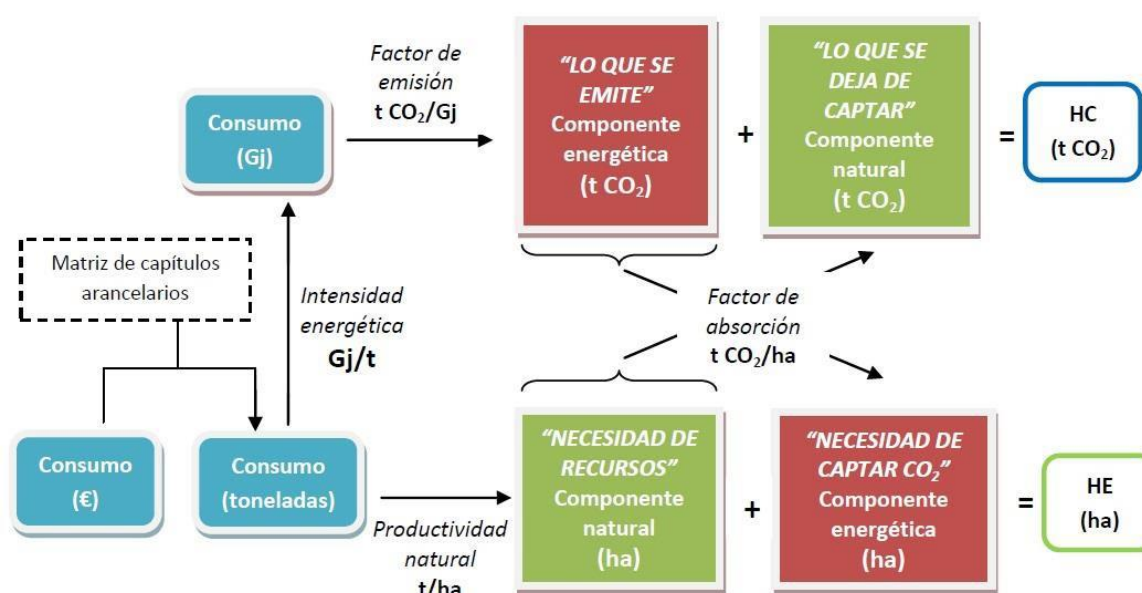


Figura 3.2: Esquema de cálculo de la Huella de Carbono y la Huella Ecológica a través del inventario de consumos (Blanquer Rodríguez 2012)

La descripción del procedimiento de cálculo presente en este inventario puede dividirse en función de los tres alcances comúnmente descritos en los trabajo de HC de organización (alcances 1, 2 y 3). Las emisiones del alcance 1 se calculan bien introduciendo el dato en unidades físicas o, en caso de no estar disponible, en unidades económicas. En este caso, la transformación de euros a unidades físicas se realiza en función de los precios medios de venta de los combustibles publicados por Ministerio de Industria, Energía y Turismo (CORES 2012). Una vez obtenidas las unidades físicas se transforma en función del tipo de combustible y sus especificaciones técnicas normalizadas en unidades de energía. Para casos especiales,



como por ejemplo el de la utilización de biomasa, se asigna el poder calorífico de menor cuantía según los datos anuales publicados en IDAE (2011). Finalmente la HC se calcula utilizando el factor de emisión del combustible utilizando las fuentes del IPCC (2006) y del IDAE (2011). Además de la huella directa (alcance 1), el método MC3 determina la Huella derivada del ciclo de vida del combustible, para lo cual se utilizan las pérdidas de energía primaria publicadas por el IDAE (2011).

Las emisiones del alcance 2 se calculan siguiendo los pasos que se mencionan a continuación: (a) obtención del mix energético del proveedor de energía; (b) cálculo del consumo en función de la tecnologías de generación; (c) cálculo de la HC en función del consumo de energía convencional de acuerdo con los datos publicados del IDAE (2011) e IPCC (2006b); (d) cálculo de la HC para los casos de energía no convencional tales como la energía nucleares y renovables (Meier et al. 2005; Spadaro et al. 2000; Spath y Mann 2004).

El resto de emisiones del alcance 3 se calculan teniendo en cuenta todos los gastos e inversiones del inventario. Tan solo los salarios y donaciones no finalistas serán las únicas categorías que no imputan huella, es decir, que no tienen huella asociada. Todo el resto de cuantías económicas, como compras de materiales, pago de impuestos, multas, etc., deberán ser introducidos en la herramienta MC3 y se seguirán en su mayoría los pasos descritos en la Figura 3.2 que se resumen en: (a) la conversión de unidades monetarias de toneladas de producto, utilizando la base de datos de comercio exterior (Agencia Tributaria 2010); (b) la conversión de las toneladas a energía consumida en su ciclo de vida *de la cuna a la puerta*, hecha por medio de la metodología publicada por Simmons et al. (2006) y



método descrito previamente por Wackernagel et al. (2005). En el caso del consumo de servicios, el procedimiento consiste en estimar el porcentaje de la factura que se refiere a la energía consumida por la actividad. El consumo de recursos forestales, agrícolas y pesqueros tienen la peculiaridad, con respecto a los materiales inorgánicos, de contar con una componente de la Huella natural debida al consumo de superficie biológicamente productiva, además de con la Huella energética. Esta demanda natural de superficie se calcula de acuerdo con la base de datos de la FAO de productividades medias nacionales (2012). Una vez determinada la demanda de superficie, se utilizan los factores de absorción previamente explicados para el análisis de la HC por uso de suelo (ver apartado 3.2.1 de Materiales y Métodos). De manera específica, el consumo de agua se divide en varias categorías diferentes, atendiendo a dos tipos de componentes en la HC: una HC energética, debida a la recolección y distribución del agua, y una HC natural, debida al uso de superficie forestal.

4. Nuevos estándares de normalización (ISO/TS 14067 e ISO/TR 14069)

Un método de cálculo que ofrezca resultados consistentes con los estándares de normalización del ámbito internacional es clave para garantizar el éxito de su implantación. En este sentido, es importante tener presente la normalización de los cálculos de la HC que ha ido avanzando de manera paralela en dos subcomités distintos de normalización: Subcomité 2 (ACV) para el cálculo de la HC de producto y Subcomité 7 (Gestión de GEI y las actividades conexas) para el cálculo de la HC de organización. Los últimos avances han sido desarrollados por un único subcomité (Subcomité 7), sin embargo, han sido publicadas dos referencias que



mantienen la divergencia organización-producto. A continuación se detallan ambos estándares, claves para mantener la fortaleza del enfoque integrado presente en el MC3.

4.1. Especificación técnica ISO/TS 14067

La especificación técnica ISO/TS 14067:2013 *“Greenhouse gases -- Carbon footprint of products -- Requirements and guidelines for quantification and communication”* (en adelante únicamente Especificación), circulará públicamente durante los próximos tres años (2013-2015) a la espera de que sea votada de nuevo y pueda convertirse en un documento bajo la categoría de Norma ISO. Entre las consideraciones generales más importantes de la actual Especificación destacan:

- a) Sólo aborda la categoría de impacto de cambio climático. En este sentido, impactos relativos a otras categorías (por ejemplo, acidificación), no tienen que ser cuantificados ni comunicados.
- b) Se permite la cuantificación y la comunicación de la HC parcial de un producto. Ello hace que las fases de uso y fin de vida sean voluntarias y el análisis de la HC no tenga que ser un ACV completo.
- c) Se considera el desarrollo de Reglas de Categoría para la HC de producto (más conocido por las siglas en inglés, *“CFP-PCR”*), o la adopción de Reglas de Categoría de Producto (siglas en inglés, *“PCR”*)



que ya hayan sido desarrolladas de conformidad con la norma ISO 14025 y sean compatibles con la Especificación. Esta consideración es clave para garantizar la comparabilidad entre estudios.

- d) La compensación está fuera del ámbito de aplicación de la norma. Por lo tanto no se establece ningún requisito ni directriz para la consideración de estas emisiones de GEI.

La Especificación informa de posibles contenidos que pueden ser contenidos del informe. En la Figura 3.3 se presenta una clasificación de los componentes específicos dentro de los estudios de la HC de producto.

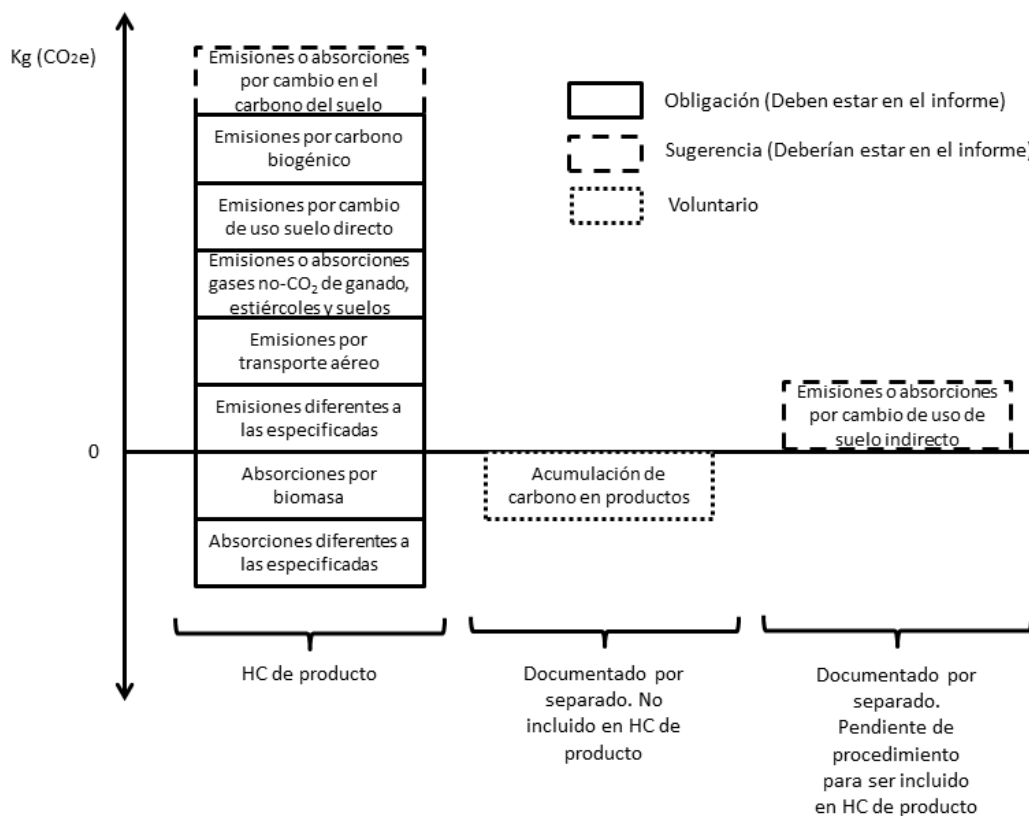


Figura 3.3: Componentes específicos dentro de los estudios de la HC de producto



4.2. Informe técnico ISO/TR 14069:2013

El informe técnico ISO/TR 14069:2013 *“Quantification and reporting of greenhouse gas emissions for organizations — Guidance for the application of ISO 14064-1”* (en adelante únicamente Informe) tiene como objeto elaborar orientaciones para permitir a las organizaciones de todo el mundo la cuantificación de sus emisiones y absorciones de GEI. El Informe, además de utilizar los principios y directrices de la ISO 14064-1, incorpora muchos de los conceptos claves y requisitos establecidos en el *“GHG Protocol”* (WRI y WBCSD 2011b; 2004).

De acuerdo al Informe, cada organización debe establecer, documentar y explicar sus límites operacionales. Para ello, deberá identificar las emisiones y absorciones de GEI asociadas a sus operaciones. La clasificación de las emisiones y absorciones de GEI se realizará teniendo en cuenta lo siguiente:

- a) Emisiones y absorciones directas de GEI: La organización debe cuantificar las emisiones directas de GEI que provienen de sus instalaciones. También denominado emisiones del alcance 1 en el Protocolo GEI.
- b) Emisiones indirectas de GEI por energía: La organización debe cuantificar las emisiones indirectas de GEI que provienen de electricidad, calor o vapor de origen externo como consecuencia del consumo de energía de la organización. También denominado emisiones del alcance 2 en el Protocolo GEI
- c) Otras emisiones indirectas de GEI: La organización puede cuantificar de manera voluntaria otras emisiones indirectas de GEI. En ocasiones

existen Programas de Comunicación que establecen requisitos.

También denominado emisiones del alcance 3 en el Protocolo GEI

Según la ISO/TR 14069, las emisiones pueden ser divididas en aguas arriba (en inglés “*upstream*”), aguas abajo (en inglés “*downstream*”) y fuera de la corriente (en inglés “*out of stream*”). La Figura 3.4 muestra más detalles sobre la inclusión de estas categorías y las mencionadas relativas a los alcances.

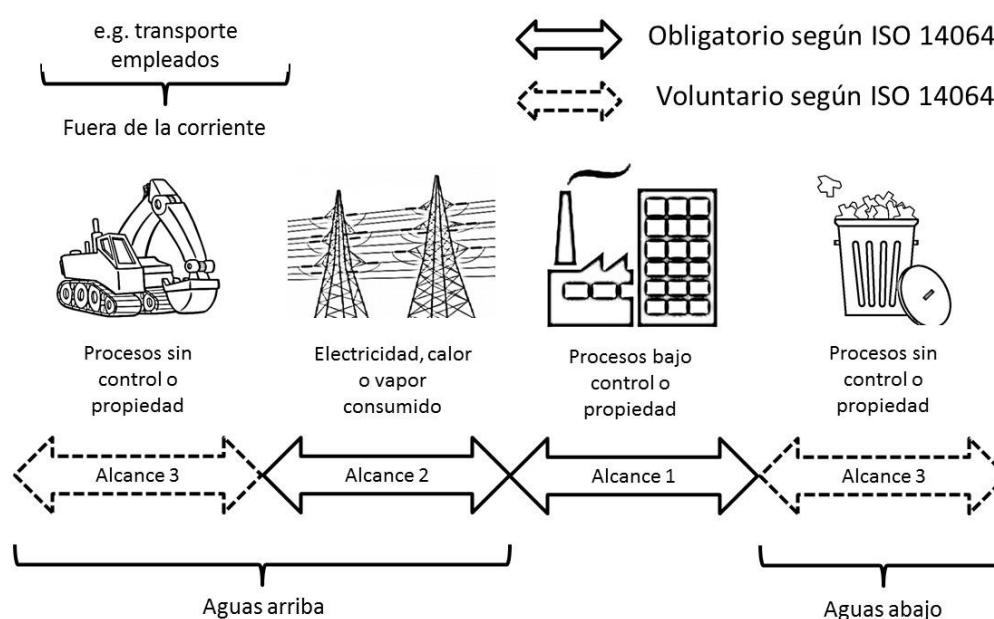


Figura 3.4: Clasificación de emisiones dentro de los límites operacionales.

Las emisiones y absorciones de GEI se clasifican según el Informe en las 23 categorías que figuran a continuación (ver Tabla 3.4). Cada emisión sólo puede pertenecer a una categoría. Además, deberá consultarse información adicional sobre los requisitos específicos del sector que puede estar disponible en directrices o normas específicas de dicho sector. Por último, el Informe señala que la cuantificación de absorciones es voluntaria.



Tabla 3.4: Clasificación de las emisiones y absorciones de Gases de efecto invernadero según ISO/TR 14069.

Clasificación	Categoría
Emisiones y absorciones directas	1) Emisiones directas procedentes de la combustión estacionaria
	2) Emisiones directas de combustión móvil
	3) Emisiones directas relacionadas con procesos emisiones
	4) Emisiones directas fugitivas
	5) Emisiones y absorciones directas derivadas del Uso del Suelo, Cambio de Uso y Silvicultura (en inglés, “LULUCF”)
Emisiones indirectas por energía	6) Emisiones indirectas de la electricidad importada consumida
	7) Emisiones indirectas procedentes de la energía (vapor, calefacción, refrigeración y aire comprimido) importada y consumida mediante red física
Otras emisiones indirectas	8) Emisiones relativas a la energía no incluidas anteriormente
	9) Emisiones de productos comprados
	10) Emisiones de bienes de equipo
	11) Emisiones por la generación de residuos
	12) Emisiones por transporte y distribución aguas arriba
	13) Emisiones por viajes de negocios
	14) Emisiones por arrendamiento de activos aguas arriba
	15) Emisiones por inversiones
	16) Emisiones por transporte de visitantes y clientes
	17) Emisiones por transporte y distribución aguas abajo
Aguas abajo	18) Emisiones por uso del producto
	19) Emisiones por fin de vida del producto
	20) Emisiones por franquicias aguas abajo
	21) Emisiones por activos arrendados aguas abajo
	22) Emisiones por desplazamientos de empleados
Ambas	23) Otras emisiones o absorciones indirectas no incluidos en las otras 22 categorías

RESULTADOS: CASOS DE ESTUDIO

RESULTS: CASES STUDIES

El capítulo se ha redactado en inglés a fin de aportar los manuscritos que en determinados casos ya han sido publicados por revistas internacionales en revisión por pares.

--

The chapter has been written in English in order to provide manuscripts that in certain cases have already been published in peer reviewed international journals.

Research articles derived from this chapter:

Alvarez, S., Blanquer, M., Rubio, A., 2014. Carbon footprint using the Compound Method based on Financial Accounts. The case of the School of Forestry Engineering, Technical University of Madrid. *J. Clean. Prod.* 66, 224–232. doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.050

Alvarez, S., Rubio, A., 2015. Compound Method Based on Financial Accounts versus Process Life Cycle Analysis in Product Carbon Footprint: a Comparison Using Wood Pallets. *Ecol. Indic.* 49, 88–94. doi:10.1016/j.ecolind.2014.10.005

Alvarez, S., Sosa, M., Rubio, A., 2015. Product and corporate carbon footprint using the compound method based on financial accounts. The case of Osorio wind farms. *Appl. Energy* 139, 196–204. doi:10.1016/j.apenergy.2014.11.039

ALVAREZ S., RUBIO A., OWEN A., BARRETT J. 2012. Isolating economies. Is trade a large CO₂ driver? In: *The 20th International Input- Output Conference*. International Input-Output Association. 24-29 June 2012. Bratislava (Slovakia)

ALVAREZ S., RUBIO A. 2014. Assessment of International trade as CO₂ driver lessons learned from the Domestic Technology Assumption. *Economic System Research* (manuscript in preparation)

[Contenido de la tesis no incluido por cuestiones de confidencialidad. En caso de interés, acceder a los trabajos a través de la referencia aportada]

DISCUSIÓN



1. Fortalezas del MC3

El MC3 como herramienta para el cálculo de la HC ha experimentado una constante evolución desde su primera versión (Doménech 2007). La presente tesis doctoral aplica las versiones: 2.0 (Carballo-Penela y Doménech, 2010) para el caso de estudio 1; 12.3 (Carbonfeel 2013) para el caso de estudio 2; y BookFeel.076.0000.BRL.00 y BookFeel.724.0000.EUR.00 (Carbonfeel 2013) para el caso de estudio 3. Las versiones de los casos de estudio 2 y 3 han sido desarrolladas desde la participación directa en el Proyecto Carbonfeel.

La investigación desarrollada permite realizar un análisis crítico sobre los aspectos positivos del MC3 y también sobre algunos aspectos a mejorar. En primer lugar se discuten diferentes aspectos que se han considerado claves y que ponen en valor los avances metodológicos desarrollados en favor de la internacionalización y de la armonización con los estándares internacionales de la HC (ISO/TS 14067 e ISO/TR 14069).

1.1. Límites del sistema

El correcto establecimiento de los límites del sistema es posiblemente el mayor de los retos dentro de los trabajos de HC. Las emisiones indirectas derivadas de la cadena de valor y/o cadena de suministro (en definitiva, las emisiones del alcance 3) no siempre han sido correctamente analizadas dentro de los estudios desarrollados desde la aplicación de las técnicas de Análisis de Procesos para el ACV (Matthews et al. 2008). Las consecuencias de esta incorrecta definición de los límites del sistema son muy notables: según algunos autores (por ejemplo, Huang



et al. 2009) estas emisiones alcanzan de media más del 75% de las emisiones totales asociadas a una organización o producto. Por ello, su correcto análisis es clave si se desea evaluar las estrategias más efectivas de mitigación.

Los estudios 1 a 3 de resultados discuten aspectos relacionados con los diferentes criterios en el establecimiento de los límites del sistema. En concreto, el apartado 7.1 del estudio 1 (Alvarez et al. 2014), está centrado en el análisis de este aspecto. Las emisiones del alcance 3 representan para este caso de estudio el 59.0% sobre el total; un peso tres veces superior al registrado en trabajos realizados sobre similares instituciones universitarias como la Universidad de Illinois, en EEUU (Klein-Banai et al. 2010; Klein-Banai y Theis 2011). Esta importante diferencia es atribuible al hecho de que el MC3 considera todas las emisiones asociadas a los residuos, a los usos de suelo y a los consumos presentes en la contabilidad anual. Por el contrario, los investigadores norteamericanos sólo consideran dentro de este alcance 3 el transporte de alumnos y empleados, los residuos sólidos y las pérdidas por transmisión y distribución de la energía eléctrica. Esta limitación en la consideración de fuentes de emisión constriñe las estrategias de mitigación que pueden ser desarrolladas, pero también supone un impedimento para la comparación dado que al considerar un menor número de fuentes de emisión, las emisiones normalizadas por alumno han de ser menores a las obtenidas en nuestro estudio.

Esta falta de criterios únicos para el establecimiento de límites también está muy presente en los casos descritos de HC para la energía eólica (Arvesen y Hertwich 2012) relacionados con nuestro caso de estudio 3. De hecho, no se ha encontrado en la literatura científica ningún trabajo que llegue a la misma profundidad de análisis en



la consideración de fases, procesos y fuentes como las descritas en el trabajo desarrollado. En este sentido, de una manera particular, el estudio relativo a la comparación del MC3 y del Análisis de Procesos (caso de estudio 2) pone de manifiesto la capacidad del MC3 de realizar un análisis de emisiones totales, directas e indirectas, en comparación con las emisiones significantes identificadas en el Análisis de Procesos. El MC3 emplea factores derivados del Análisis Input-Output que, de manera general, siempre ofrecen mayores emisiones que las del Análisis de Procesos (Lenzen 2000). Los casos de estudio 2 y 3 apoyan lo ya expresado por Majeau-Bettez et al. (2011), relativo a que el Análisis de Procesos no puede representar el 30%, o más, del valor total de la HC, como consecuencia de la dificultad de recopilar el conjunto de las emisiones indirectas, como las asociadas a los bienes de equipo y al mantenimiento de los mismos.

La definición de los límites del sistema establecida en el MC3 trasciende la capacidad de generar resultados asociados a un alto número de fuentes de emisión. Por un lado, el MC3 es un método basado en la contabilidad económica por lo que es posible asociar a cada euro de gasto un resultado en unidades de CO₂e. Por tanto, el MC3 tiene potencial para su implantación en los mecanismos de contabilidad de cualquier proyecto, independientemente de su escala (véanse las diferentes escalas descritas en los casos de estudios 1, 2 y 3), siendo un método válido para incorporar la HC a los procesos de facturación de bienes y servicios. Sin duda, esto será un paso inicial para una auténtica contabilidad del carbono. Por otro lado, el MC3 es un método que permite la comparabilidad. El alcance organizacional queda perfectamente delimitado al considerar los límites del sistema mediante



criterios que no dependen del analista. Estos criterios empleados por el MC3 se basan en incluir la totalidad de los consumos a través del establecimiento de una referencia de estudio anual y el análisis del cierre de la contabilidad de gastos e inversiones. Esta característica del MC3 que permite la comparabilidad, es clave para alcanzar la confianza del consumidor y garantizar así, el éxito de la implantación de la HC en la sociedad.

Los trabajos desarrollados en esta tesis doctoral permiten la discusión de aspectos que podrían ser incorporados para facilitar la implantación de futuras versiones del MC3. Por un lado, el MC3 podría desarrollar la relación entre las actuales categorías de consumos y la jerarquía normalizada de categorías de contabilidad (Ministerio de Economía y Hacienda 2007). Este avance permitiría la sustitución del desarrollado análisis de facturas por un análisis directo de las Cuentas Anuales y, por tanto, una clara disminución del tiempo de trabajo. Además, considerando que las Cuentas Anuales es documentación de obligado cumplimiento para la totalidad de las sociedades mercantiles, la implementación de esta mejora permitiría una mayor capacidad para la estandarización. Por otro lado, los avances en futuras versiones del MC3 deben considerar los consensos alcanzados para la determinación de Reglas de Categoría de Producto. Véase como ejemplo las Reglas de Categoría de Producto para la producción de energía publicadas por Schmincke et al. (2007). Estos dos aspectos mencionados tienen el objetivo de permitir mejorar la comparabilidad e implementación de la HC.



1.2. Análisis Multi-impacto

El indicador HC no considera otras categorías de impacto diferentes a la de cambio climático. Esta falta de consideración de otras categorías de impacto o indicadores denominados en el ACV “*midpoint*” (por ejemplo, el agotamiento de los recursos, la acidificación o la toxicidad, entre otros; ver apartado 1.2.3. de la introducción) compromete seriamente la naturaleza misma del indicador HC como indicador de sostenibilidad. La importancia de esta debilidad queda de manifiesto en el desarrollo de la ciencia de ACV en general y en el cálculo de la HC en particular. Vease como el ejemplo la evaluación de la HC de los biocombustibles como fuente de energía. En términos de emisiones pueden ser considerados neutros (IDAE, 2011); sin embargo, los impactos asociados a las fases de cultivo pueden ser relevantes en términos de Huella Ecológica. Según diversos estudios, las decisiones basadas únicamente en la HC puede no ser las más sostenibles en un 20% de los casos (Weidema et al. 2008). En concreto, el estudio sobre 4.000 productos desarrollado por Laurent et al. (2012) mide la correlación entre la HC y las otras 13 categorías de impacto comúnmente valoradas en los trabajos de ACV (JRC-IES 2010). Los resultados muestran una baja correlación entre la HC y la toxicidad concluyendo la importancia de desarrollar herramientas que permitan evaluar y gestionar la sostenibilidad del medio ambiente en un sentido más amplio.

Tal y como pudo observarse en los capítulos 1 a 3, el MC3 es un método multi-impacto que atiende a categorías de impacto diferentes a la de cambio climático y, por tanto, aborda esta debilidad del indicador HC. En concreto se valora la categoría de impacto de uso de superficie biológicamente productiva,



entrando de lleno en la Huella Ecológica. Así, la HC calculada con MC3 es convertible a la Huella Ecológica y viceversa por medio de los establecidos factores de absorción. El análisis de la influencia específica de la HE sobre el total de las emisiones de GEI, solo se ha realizado en el caso de estudio 1 (17% sobre el total de las emisiones).

En futuras versiones del MC3 se debe considerar la posibilidad de incorporar otras categorías de impacto que puedan relacionarse con superficies biológicamente productivas. Esto sería posible mediante el concepto de *carga crítica* que mide los niveles de concentración máximos que no causan cambios suficientes para perjudicar a largo plazo la estructura y funcionamiento del ecosistema. Este avance permitiría la incorporación de equivalencias para transformar las posibles categorías de impacto (toxicidad, acidificación, etc.) en la Huella Ecológica y ésta, a su vez, en la HC. Ejemplos notables de avances en este sentido son los estudios realizados por investigadores de la Universidad de Santiago de Compostela para el desarrollo de la carga crítica de acidez con el objeto de valorar en magnitud de superficie el impacto ambiental de la acidificación (Camps Arbestain et al. 1999; Rodríguez-Lado y Macías, 2006). Otra vía para la posible incorporación de categorías de impacto diferentes a la de cambio climático es la abordada a través del concepto de la Huella Ambiental. Actualmente este indicador está en el punto de mira de las políticas europeas que buscan crear un mercado único para productos verdes (European Commission 2013b) (véase capítulo de Introducción, apartado 1.2.3).

A pesar del interés por integrar en un único indicador los posibles impactos



ambientales, la complejidad que ello acarrea puede ir en contra de la efectiva implementación del mismo (Quiroga 2007; Murray 2010). En ocasiones puede resultar más efectivo el establecimiento de políticas que limiten contaminantes en sectores específicos. Sirva como ilustración de ello los controles existentes en la producción de cemento (Xu et al. 2013) y la regulación desarrollada a raíz del Protocolo de Montreal para el control de sustancias flurocarbonadas (PNUMA 2006). De hecho, la implantación de las medidas asociadas al Protocolo de Montreal se considera un éxito dado el retroceso experimentado por el agujero en la capa de ozono del planeta (Son et al. 2008).

1.3. Enfoque integrado

La presente tesis doctoral pone en valor la importancia de desarrollar un enfoque integrado, clave para contrarrestar la amenaza derivada de la divergencia metodológica (organización vs producto).

La armonización del MC3 con los estándares ISO 14064 e ISO 14040 y ISO 14044 ha sido demostrada en trabajos previos (Carballo-Penela y Doménech 2010; Caglio et al. 2011). En la presente tesis doctoral se corrobora lo desarrollado por los mencionados autores. Sin embargo, la reciente publicación en 2013 de la especificación técnica ISO/TS 14067 y el informe técnico ISO/TR 14069 y establece un nuevo marco de requisitos que precisa ser analizado en detalle.

El enfoque integrado debe tener en cuenta lo desarrollado en ambas normativas para elaborar una metodología de cuantificación coherente. En este sentido, la Figura 5.1 muestra una propuesta de marco de aplicación del enfoque integrado desarrollado desde la revisión realizada a la especificación técnica ISO/TS

14067 e informe técnico ISO/TR 14069. Su desarrollo permitirá la aplicación del concepto de la HC bajo un mismo enfoque de aplicación tanto a organización como a producto.

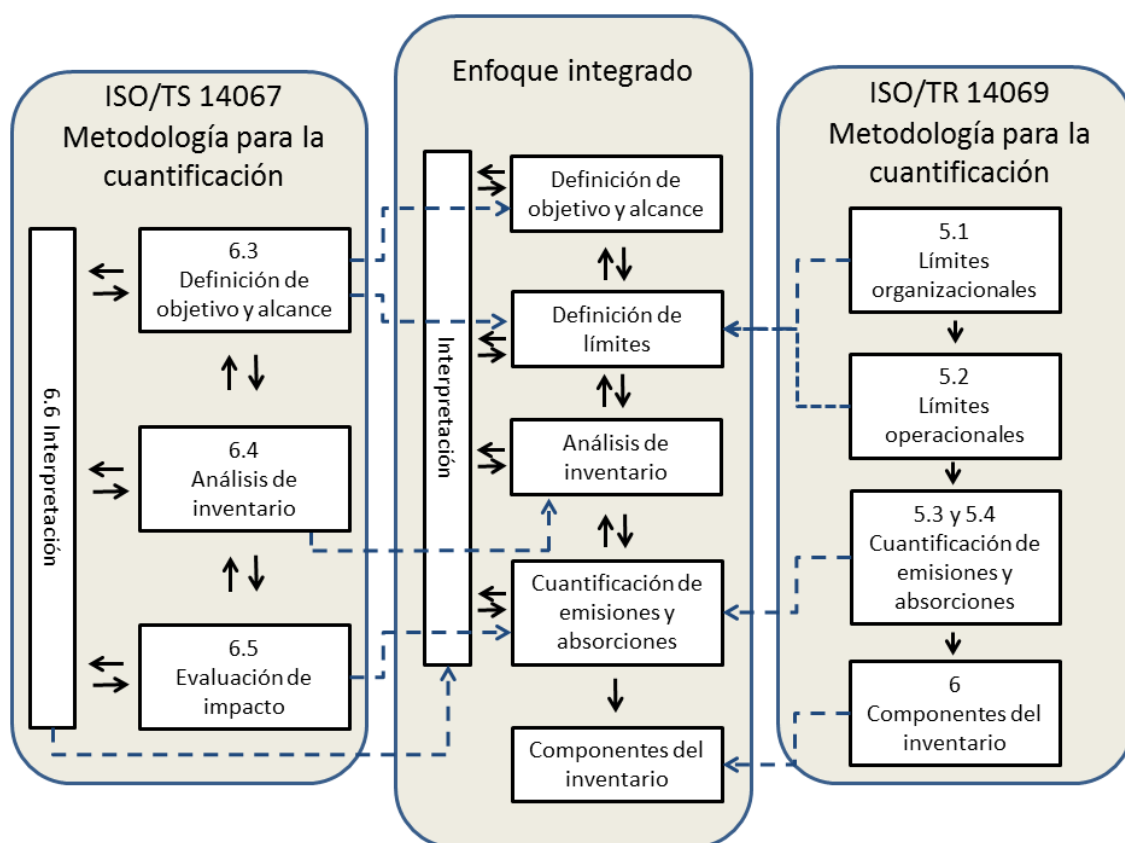


Figura 5.1: Marco consistente con ISO/TS 14067 e ISO/TR 14069 para la aplicación del enfoque integrado.

A fin de cumplir con los requisitos relacionados con la comunicación, el enfoque integrado requiere del análisis de diferentes componentes obligatorios determinados en la especificación técnica ISO/TS 14067 e informe técnico ISO/TR 14069. En la Figura 5.2 se muestra la propuesta de componentes del inventario que deben ser considerados en la cuantificación y comunicación. Esta propuesta se realiza desde la consideración de un ciclo de vida parcial, válido para la



determinación de la HC de organización y la HC parcial de producto.

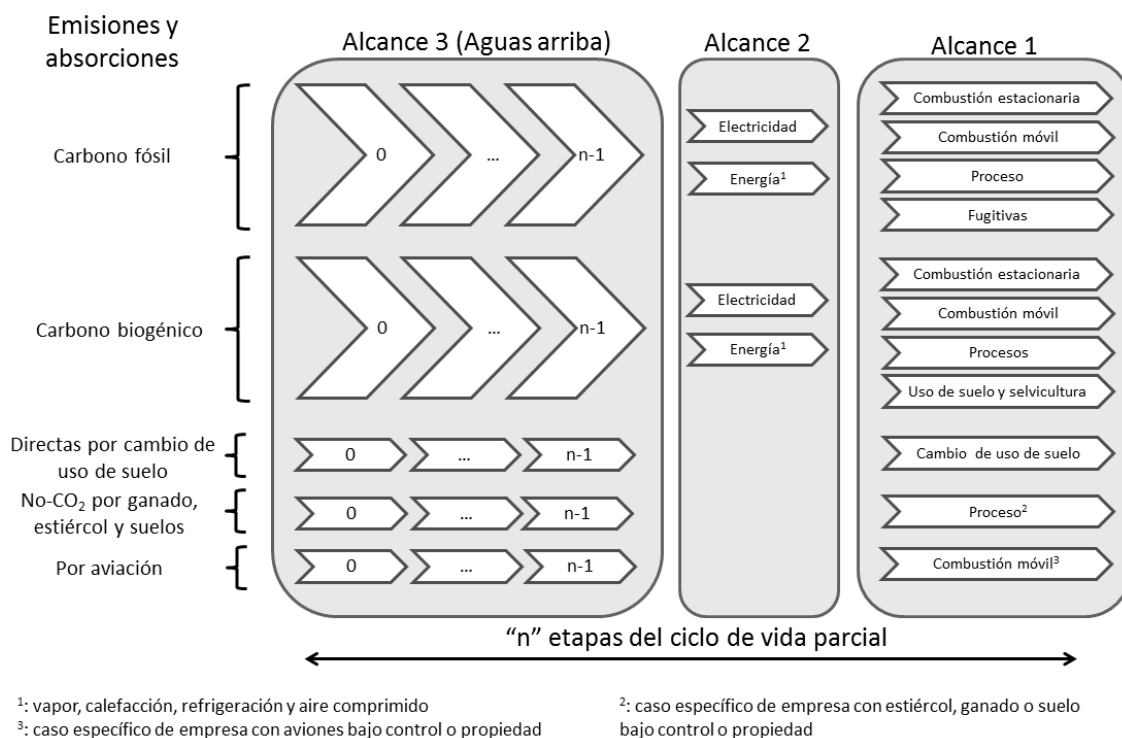


Figura 5.2: Componentes de inventario obligatorios para la HC de organización y la HC parcial de producto con enfoque integrado siendo consistente con ISO/TS 14067 e ISO/TR 14069.

Las futuras directrices o especificaciones de enfoque integrado podrán además incluir información relativa a los componentes voluntarios. Ambos documentos de referencia (ISO/TS 14067 e ISO/TR 14069) contienen amplia información que puede ser utilizada para ampliar la desagregación y la profundidad del estudio. Posibles componentes voluntarios a inventariar pueden ser el almacenamiento de carbono y las emisiones indirectas por cambio de uso de suelo.

En la proposición de nuevos avances en el enfoque integrado debe tenerse en cuenta el riesgo presente en la proliferación de metodologías. Es por ello que



dichos avances deben estar alineados con estrategias que permitan reducir esta debilidad (véase el apartado 2.4.3 de la Introducción). En concreto se proponen dos estrategias, la primera corresponde a los Programas de Comunicación, denominados también Registros. Estos programas proponen requisitos para la comunicación con una tendencia a incorporar requisitos cada vez más exigentes. Véanse como ejemplos el registro de la entidad sin ánimo de lucro *“Carbon Disclosure Project”* (Carbon Disclosure Project 2013) o el muy recientemente establecido Registro Nacional de HC aprobado en el Real Decreto 163/2014 (MAGRAMA 2014). La segunda estrategia proviene de los acuerdos internacionales generados en la Organización Internacional de Normalización. En concreto la futura publicación de la norma ISO 14072 *“Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines for organizational life cycle assessment”* se espera pueda establecer nuevos requisitos tanto para organizaciones como para productos. Se espera que los avances logrados en el presente trabajo doctoral puedan contribuir en el asentamiento del enfoque integrado como único enfoque válido para el cálculo de la HC.

Por último, existen dos aspectos del MC3 que se han considerado de gran relevancia en relación a otras herramientas de cálculo de la HC (véase el apartado 1.3 del capítulo Materiales y Métodos). En primer lugar, el MC3 es un método sencillo en su aplicación para su exhaustivo marco de información. De hecho, el MC3 no requiere de una solución con un software específico ni de conocimientos avanzados de programación. Cualquier procesador de hojas de cálculo, por ejemplo Excel de Microsoft® o Calc de LibreOffice®, son válidos para



desarrollar los cálculos de la HC. En segundo lugar, el MC3 es un método accesible y transparente, pues la hoja de cálculo es de fácil uso y acceso. Su versión MC3 2.0 se encuentra en abierto en la web *www.huellaecologica.com* (Domenech 2010) y las versiones de prueba elaboradas desde el Proyecto Carbonfeel también son gratuitamente accesibles *www.carbonfeel.org* (Carbonfeel 2013). La gestión de las licencias de uso se realiza desde una Fundación Funciona, lo que garantiza la transparencia y aleja sospechas de ánimo lucro. Es más, todo investigador puede tener acceso a la herramienta con plena capacidad de configuración, así como con toda la información que considere necesaria para avanzar en el desarrollo y en la implementación del MC3.

1.4. Internacionalización

Una de las debilidades que el MC3 ha tenido que afrontar ha sido su falta de internacionalización. Su construcción a base de factores correspondientes de manera predominante a la realidad de España requería un análisis pormenorizado de sus fuentes. Pese a estas dificultades para la adaptación, uno de los casos de estudio analizados (estudio 3) presenta la adaptación MC3 al escenario Brasil y en la actualidad son numerosos los países sobre los que se están realizando experiencias de cálculo con herramientas MC3 adaptadas. Destaca sobre todo la implantación en Sudamérica siendo Chile, Bolivia, Ecuador y Perú los países que están siendo objeto de trabajo con la herramienta y que avalan el interés suscitados en otras regiones del mundo.

Futuras versiones del MC3 deben tener en consideración la regionalidad de



todas las fuentes presentes en el método. Véase como ejemplo los factores relativos a otros países como Nueva Zelanda (Baird et al. (1997), citado por Alcorn (1998) y a su vez citado por Simmons et al. (2006)). Las estrategias descritas relativas a la actualización y coherencia de criterios. En concreto, los avances metodológicos planteados en el estudio 4 pueden ser implementados en el MC3 de modo que dichas adaptaciones permitan tener en consideración tanto la realidad geográfica, como la posible importación de bienes y servicios de otros países diferentes al ámbito territorial sobre el que la herramienta MC3 haya sido adaptada.

2. Estrategias para la actualización y coherencia de criterios

Las versiones implementadas del MC3 se han desarrollado a partir de una gran diversidad de fuentes que buscan dar respuesta a la idiosincrasia presente en las posibles categorías de productos y servicios. Según los estudios desarrollados, estos factores pueden mejorar en dos importantes aspectos: actualización y coherencia de criterios, afectando a las tres áreas de inventario presentes en el MC3: consumos, usos de suelo y residuos.

2.1. Estrategias para el inventario consumos

2.1.1. Aspectos generales

La importancia de la actualización de los factores asociados al inventario de consumos es abordada en el estudio 1. Sin embargo, hay que reconocer que existe un amplio margen de mejora y que no ha sido analizado con la necesaria profundidad. Uno de los aspectos es el relativo a la fuente empleada para la obtención de las intensidades energéticas de los materiales, obtenida de Simmons



et al. (2006). Esta referencia es sin duda una de las principales fuentes de información del MC3, dado que recopila el consumo de energía primaria (de la cuna a la puerta) de un conjunto de 624 materiales ordenados según la clasificación SITC Rev.1 (UNSTATS 2014). A pesar de la valía de dicho trabajo por el alto nivel de desagregación que presenta, hay que reconocer que, a su vez, cita estudios realizados hace más de 15 años (como el de Alcorn 1998 o el de IVEM 1999). Esta circunstancia también está presente en el cálculo de la HC en relación al consumo del agua, cuya fuente bibliográfica proviene de una estimación del consumo energético realizada hace más de 25 años (IDAE 1989).

Otro aspecto a mejorar es el relativo a la coherencia en los criterios utilizados. Sirva a modo de ejemplo el análisis de los criterios presentes en el MC3 para el cálculo de emisiones indirectas de la electricidad. Por un lado, se consideran los factores de emisiones publicados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE 2011), que generan resultados en unidades de CO₂ asociado a la generación, transformación y distribución de energía eléctrica. Por otro lado, dado que la referencia de IDAE (2011) no considera las emisiones asociadas a las energías renovables y nuclear, se han considerado también los factores proporcionados por Spadaro et al. (2000), Spath and Mann (2004) y Meier et al. (2005). Esta conjunción de diferentes fuentes introduce diferentes criterios en un mismo elemento de análisis, dado que los últimos autores consideran las emisiones asociadas a las infraestructuras y a otros GEI diferentes al CO₂.

Las estrategias de mejora asociadas al inventario de consumos pueden



organizarse en base a 3 áreas: (1) combustibles, (2) electricidad y (3) otros consumos.

2.1.2. Mejoras en relación al área de combustibles

En relación al área de combustibles, la principal fuente de información a emplear debe ser la establecida por el IPCC para la elaboración de inventarios nacionales, concretamente el volumen 2 -relativo a Energía- y el volumen 3 -relativo a Procesos industriales y uso de productos-. Sin embargo, estas fuentes del IPCC no toman en consideración las emisiones asociadas al ciclo de vida de los combustibles. A fin de determinar estas emisiones indirectas, y siguiendo el criterio de localizar bases de datos de reconocido prestigio internacional que estén siendo verificadas por organismos internacionales e independientes, se recomienda consultar las últimas publicaciones del año 2013 *“Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context”* (JEC - Joint Research Centre - EUCAR - CONCAWE 2014). En estos informes se presentan datos, no solo de combustibles convencionales, sino también de combustibles futuros.

2.1.3. Mejoras en relación al área de electricidad

Las mejoras asociadas al área electricidad pueden ser desarrolladas desde el análisis único de la información publicada por la Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency 2013). De esta manera se reduce la heterogeneidad de las fuentes y con ello se facilita la internacionalización con factores de emisión específicos para cada tecnología y cada país. Es más, estas estadísticas permiten determinar, por un lado, la energía primaria asociada a las pérdidas de



conversión, transmisión y distribución de la electricidad. Por otro lado, la publicación de las importaciones y exportaciones entre los 34 países miembros de la OCDE permite la obtención de factores específicos de cada país.

Además estas estadísticas se generan anualmente, lo que permitiría la actualización anual del método y, por tanto, el correcto análisis de mejoras en la eficiencia de los procesos relativos al consumo de energía eléctrica. Sin embargo, una de las debilidades que plantea esta propuesta es que la Agencia Internacional de la Energía no determina la energía asociada a infraestructuras y bienes de equipo, por lo tanto, una parte de la Huella quedaría aún sin resolver. Esta debilidad podría quedar resuelta mediante el análisis de trabajos de investigación, como los realizados por Weisser (2007) o el análisis de estudios realizados en base a la Reglas de Categoría de Producto relativas a las categorías CPC 171 “Energía eléctrica” y CPC 173 “Vapor y agua caliente”(Schmincke et al. 2007). En el caso de utilizar diferentes fuentes, se debe seleccionar emisiones que compartan los mismos criterios para el establecimiento de los límites del sistema. Weisser (2007) ofrece una amplia clasificación de posibles apartados específicos para la generación de energía eléctrica.

2.1.4. Mejoras en relación al área otros consumos

En lo relativo a otros consumos, una de las principales fuentes de información a considerar es el reciente desarrollo de modelos de análisis MRIO. El caso de estudio 4 pone en valor la utilidad de estas técnicas de análisis. En concreto, cabe destacar la última versión de GTAP 8 (Narayanan et al. 2012), así como las nuevas tablas WIOD (Timmer 2012) y EORA (Lenzen et al. 2012; Lenzen et al. 2013);



véase la Tabla 3.1 para un resumen de las principales características. Estas tablas se desarrollan sobre sectores de la economía que permiten la relación con las posibles tipologías de productos y servicios consumidos por una empresa. Gracias a su construcción y base metodológica, los factores derivados consideran el conjunto de emisiones directas e indirectas. Además, las tablas MRIO permiten la desagregación por niveles según el efecto multiplicador descrito en el apartado 2.2 del capítulo Materiales de Métodos. Estos niveles de desagregación permiten relacionar los consumos a las etapas del ciclo de vida del producto o del servicio.

Pese a estas fortalezas, el enfoque Input-Output presenta debilidades en lo relacionado al escaso número de sectores económicos. Desde este análisis se valora la tabla WIOD como la base de datos que puede proporcionar mayor consistencia al MC3. Por un lado, WIOD ha sido construida con datos de la OCDE de manera anual con un amplio espacio temporal. Por otro lado, gracias a la publicación de las tablas origen-destino, se puede valorar el desarrollo de tablas simétricas en base a las hipótesis de tecnología de producto, lo que permitiría aumentar el rango de análisis de los actuales 35 sectores económicos a 59 productos. Por último, es interesante señalar las posibilidades de mayor desagregación empleando las técnicas descritas en el apartado 2.4.2. “Análisis híbrido basado en Input-Output” de la Introducción. La mejora en la desagregación puede aumentar la precisión de los multiplicadores de manera significativa (Lenzen 2011). Sirva como ejemplo la desagregación en 498 sectores para la evaluación ambiental de productos según las tablas Input-Output de la economía de los Estados Unidos (Joshi 1999).

Otro aspecto de mejora relativo a esta área es el fenómeno de economía de



escalas. Este es un fenómeno presentado en el estudio 1 es común en cualquier herramienta de la HC, por lo que no debe ser asociado de manera específica al MC3 (Hoesly et al. 2012). De manera específica al MC3, la conversión unidades monetarias (€) a unidades físicas (toneladas) se desarrolla de forma independiente mediante el análisis de estadísticas de comercio exterior y, por tanto, en su mayor parte venta al por mayor. En concreto, para España se emplea la base de datos de capítulos arancelarios publicada por la Agencia Tributaria (2010). En caso de adaptaciones del MC3 al extranjero (por ejemplo, lo desarrollado para la adaptación de la herramienta a Brasil) se ha empleado la base de datos elaborada por Naciones Unidas (UN Comtrade 2013). Estas fuentes de información son válidas a nivel nacional, pero pueden producir diferencias significativas por el factor de economía de escala. Es por ello que las emisiones asociadas a compras minoristas podrían estar sub- o sobreestimadas. Por ejemplo, la cantidad de material de oficina por € comprado por un consumidor final puede ser diferente de la cantidad de material de oficina por € comprado por una empresa internacional responsable de las ventas internacionales. Por lo tanto, el MC3 no estaría teniendo en cuenta todos los eslabones intermedios, comerciales y logísticos que van aportando Huella.

Las estrategias para afrontar el factor de economía de escala requieren del conocimiento de las diferencias entre precios básicos y precios de comprador. Las tablas Input-Output se construyen por lo general en precios básicos, lo que significa que reflejan los costes de todos los elementos inherentes a la producción a cargo del productor. Sin embargo, el inventario de consumos es elaborado en base a precios de comprador, dado que reflejan la cantidad pagada por el comprador. La diferencia



entre ambos enfoques son los márgenes (comercio, transportes, etc.) e impuestos netos (impuestos menos subvenciones). Para el caso de la Unión Europea, la agencia Eurostat estima matrices (denominadas en inglés “*valuation matrices*”) a partir de fuentes de datos públicas en donde se detallan márgenes asociados al comercio al por menor, comercio al por mayor, transporte, etc. (Eurostat 2008, Capítulo 6). Sin embargo, estas matrices no son accesibles para el público general y necesitan ser estimadas (Timmer 2012). Su análisis podría proporcionar estrategias para solucionar la debilidad en los cálculos de la HC asociada al fenómeno de la economía de escala.

2.2. Estrategias en relación al inventario de residuos

Dentro de la gestión de este inventario el MC3 presenta importantes áreas de mejora, las cuales se pueden resumir en:

- a) El MC3 emplea para el cálculo de la Huella de la gestión de los residuos los factores derivados de los trabajos realizados por Marañón et al. (2008) por lo que pueden estar sujetos a la específica casuística de los casos analizados por éstos.
- b) El MC3 atribuye la Huella de la gestión de residuos en su totalidad al generador del residuo, por lo que no se atiende al posible reparto en función la responsabilidad de cada eslabón de la cadena. En consecuencia, con la propuesta de Carbonfeel MC3 v.12.1, se perjudica el reciclaje de residuos frente a su eliminación por vertedero. Esta inconsistencia se produce porque el gasto energético y uso de superficie en el reciclado de la fracción selectiva de residuos (orgánicos, papel, envases ligeros) es superior



al gasto energético y uso de superficie en la eliminación del residuos por vertedero.

Las estrategias para la actualización y mejora de los criterios en este inventario pueden ser desarrolladas empleando los resultados de dos grandes trabajos de investigación relacionados con los aspectos ambientales de la gestión de residuos. El primero de ellos es el Proyecto Fenix (ESCI-UPF et al. 2013), un proyecto europeo con financiación del instrumento de la UE del tipo LIFE+ que tuvo como objetivo crear una herramienta informática flexible y fácil de utilizar para las administraciones de los países de España y Portugal. La herramienta permite una completa valoración del impacto ambiental de la gestión de residuos mediante la metodología del ACV y considera seis fracciones de residuos no peligrosos, proporcionando alternativas para la completa caracterización de la gestión del residuo. El segundo trabajo es el Proyecto CO₂ Zero Waste (Sevigné Itoiz et al. 2013) que, de una manera similar al Proyecto Fenix, ha elaborado la herramienta CO2ZW válida para la evaluación de únicamente de emisiones de GEI para seis tipologías de fracciones de residuos. La caracterización de la gestión de residuos está menos detallada que en la herramienta elaborada por el Proyecto Fenix. No obstante, CO2ZW permite el trabajo con valores medios para el conjunto de la Unión Europea y de manera específica para un mayor número de países europeos: España, Italia, Eslovenia y Grecia. Esta mayor capacidad para estudio en diferentes escenarios hace que la herramienta CO2ZW resulte de mayor interés para su implementación en el MC3. Sin embargo, las dos herramientas mencionadas no tienen en consideración la gestión de residuos peligrosos.



Dentro del área de residuos peligrosos las estrategias de mejora deben ser trabajadas analizando la relación con el gestor autorizado y la planta de tratamiento final. Lo más apropiado sería asignar parte de la Huella de los residuos a estos gestores y contabilizar la Huella como cualquier otro servicio contratado por la organización (de hecho, el coste de un gestor autorizado incluye el coste del tratamiento final). No obstante, por razones de transparencia y claridad podría ser adecuado, por el momento, mantener la metodología actual en donde la Huella de los gestores autorizados se puede incluir a través de su coste en la Huella de los servicios (dentro de la consideración de “servicios con alta movilidad”) o bien a través de su volumen en peso (toneladas) en la Huella de los residuos.

2.3. Estrategias en relación al inventario de usos de suelo

Los factores de absorción empleados por el MC3 para la transformación de emisiones a superficie provienen de cuatro fuentes diferentes (ECCP 2004; El Bouazzaoui et al. 2007; Sabine et al. 2004; Soussana et al. 2004). Esta heterogeneidad añade un alto grado de incertidumbre al cálculo de la HC, dado que los cuatro trabajos han sido elaborados bajo condiciones de estudio diferentes. Con frecuencia el criterio empleado en la selección de la fuente a utilizar ha sido la relación con el factor de absorciones de bosques por contar con el mayor reconocimiento internacional.

Las estrategias para la mejora en el análisis de la HC de usos de suelo deben ser desarrolladas en función de posibles tipologías. En este sentido, se reconoce las posibilidades de uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura (por su



frecuente utilización de las siglas en inglés LULUCF de “*land use, land use change and forestry*”). La Figura 5.3 muestra en detalle estos posibles aspectos que deben ser tenidos en cuenta en su aportación tanto directa como indirecta. En este sentido los avances pueden ser desarrolladas en base a dos grandes referencias: la primera es el volumen 4 del IPCC relativo a las directrices para la elaboración de inventarios nacionales (IPCC 2006) y la segunda es el empleo de factores de caracterización y rendimiento de la “*Global Footprint Network*”. El IPCC (2006) establece una clara jerarquía de tres niveles para la elaboración de inventarios: el nivel 1 utiliza valores por defecto y ecuaciones básicas; el nivel 2 utiliza la misma aproximación que el nivel 1 pero con valores específicos para los diferentes países y regiones; el nivel 3 proporciona un alto nivel de detalle por todas las posibilidades de compilación para la elaboración del inventario.

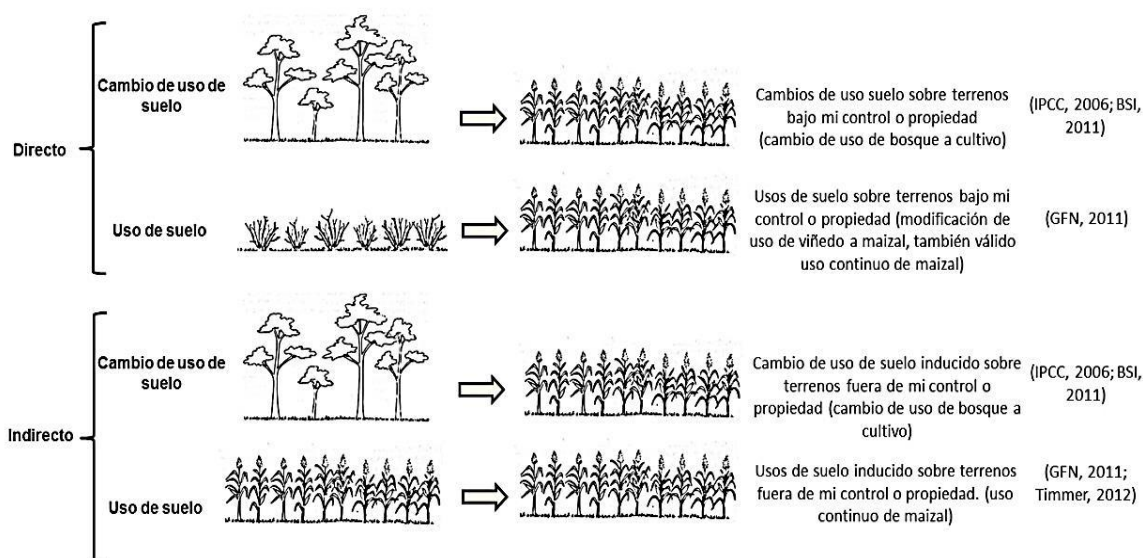


Figura 5.3: Caracterización de las diferentes tipologías de cambio y uso de suelo. Posibles ejemplos relativos a instalación de una planta de bioetanol mediante consumo de maíz.



Los avances del MC3 deben tener en cuenta las referencias antes mencionadas así como ir encaminados en función de los requisitos descritos en los estándares ISO/TS 14067 e ISO/TR 14069. En este sentido, se debe dar prioridad al cálculo de las emisiones directas por cambio de uso de suelo (en inglés, *“direct land use change”*). Una buena aproximación a este conjunto de emisiones es la proporcionada en el anexo C del estándar PAS 2050 (BSI, 2008) dicho estándar proporciona factores de emisión basados en los criterios de nivel 1 de las directrices del IPCC (2006) para un conjunto de 16 países.

Además de las emisiones por cambio de uso de suelo, las emisiones por uso del suelo pueden ser calculadas desde la base desarrollada en el documento *“Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry”* y el mencionado volumen 4 de Directrices para la elaboración de inventarios nacionales (IPCC 2003, 2006). Estos documentos proporcionan ecuaciones y métodos para la contabilidad de la biomasa, materia orgánica muerta y carbono orgánico del suelo según diferentes categorías de uso del suelo. Los avances para mejorar estos factores pueden estar asociados a dos posibles vías. La primera es la relativa al empleo del software para la elaboración de inventarios nacionales del IPCC (IPCC 2013). Este software incluye un gran número de referencias propuestas por el IPCC para la determinación de ganancias y pérdidas de carbono en los ecosistemas. Pese a la robustez de esta solución hay que considerar que es compleja en su desarrollo por la gran cantidad de variables a gestionar. La segunda opción consiste en la combinación de los factores de absorción por la categoría de bosques publicados anualmente por la organización internacional *“Global Footprint Network”*, junto con los factores de rendimiento



publicados anualmente para cada país y tipología de terreno. La combinación de estos factores elaborados desde el análisis de estadísticas de FAO, permitiría determinar factores de absorción por uso de suelo en función de cada país y tipología de terreno. Estos avances basados en la “*Global Footprint Network*”, no consideran de manera directa variaciones en función del tipo de gestión y especies. Sin embargo, sí son considerados de manera indirecta dado que los factores son elaborados desde el análisis de las estadísticas de la FAO que incorporan la influencia por la gestión y especies.

Por último, MC3 puede incorporar avances en la línea de considerar el carbono acumulado en productos. En este sentido se deben considerar las ecuaciones y métodos proporcionados en el capítulo 12 del Volumen 4 de las Directrices del IPCC (2006). Estas fuentes permiten convertir a nivel nacional, unidades de productos forestales (por ejemplo, madera en rollo, papel, etc.) en unidades de carbono.

2.4. Estrategias en relación al enfoque híbrido integrado

En el medio plazo, la puesta en marcha del conjunto de estrategias descritas en los apartados anteriores permitiría el salto del MC3 desde el actual esquema de método híbrido por niveles hacia un esquema de método híbrido integrado (Suh y Huppel 2005). Esta adaptación es posible mediante la combinación de las diferentes matrices elaboradas según los criterios descritos. El método híbrido integrado permite el desarrollo del conjunto de técnicas descritas para el Análisis Input-Output. Entre estas se detalla la modelización del cambio estructural para



determinar las transformaciones tecnológicas que se desarrollan en el conjunto de economías y sectores productivos (Dietzenbacher y Stage 2006) y, más importante, permitiría el análisis de senda estructural, para determinar las emisiones e impactos asociados a los diferentes eslabones de la cadena de producción (Lenzen 2007).

CONCLUSIONES



La lucha contra el cambio climático supone uno de los retos ambientales más importantes para este siglo XXI. La reglamentación actual establece derechos de emisión sobre las actividades afectadas por el Protocolo de Kioto. Sin embargo para conseguir reducir las emisiones globales es necesario poner en marcha estrategias basadas en el consumidor. La demanda de una baja HC puede ser un factor clave para estimular cambios en los hábitos de consumos y mejorar la eficiencia en los procesos de producción.

La presente tesis doctoral tiene como objetivo principal la evaluación del MC3 como herramienta de cálculo de la HC válida tanto para organización como para producto. A continuación se presentan las principales conclusiones derivadas del trabajo de investigación.

1. El MC3 es un método de Análisis Híbrido por Niveles que permite el cálculo de la HC con enfoque integrado. Según los trabajos desarrollados, su aplicación es práctica y válida para cualquier tipo de actividad (individuo, organización, territorio, evento, producto o servicio).
2. El MC3 permite el cálculo de la HC sin la necesidad de umbrales ni criterios de corte subjetivos. Por lo tanto, los límites del sistema se establecen de manera objetiva, clave para la comparabilidad y confianza del mercado y consumidores.
3. El MC3 permite un análisis multi-impacto, es decir, considera otras categorías de impacto diferentes al cambio climático. En concreto, valora la superficie biológicamente productiva, clave para una búsqueda de la sostenibilidad ambiental.



4. El MC3 cumple con los principales estándares internacionales para el cálculo de la HC parcial de producto ("*Product GHG Protocol*" e ISO/TR 14067) como el inventario de GEI de organización ("*GHG Protocol*" e ISO/TS 14069). Por lo tanto, se adapta a los consensos internacionales cumpliendo con los principios de relevancia, integridad, consistencia, coherencia y transparencia.
5. El MC3 puede ser adaptado y ser aplicado con éxito a diferentes escenarios internacionales sin importar el tamaño y tipo de organización o producto objeto de estudio.
6. El MC3 puede ser mejorado a través de estrategias de actualización de factores y coherencia de criterios en la selección de fuentes. Estos avances permitirían valorar su desarrollo futuro como método de Análisis Híbrido Integrado.
7. En resumen, el MC3 es un método capaz de hacer frente a un cambio de paradigma en la economía mundial. De manera que su implantación global permitiría, tanto a empresas como a consumidores, funcionar como motores de cambio hacia una economía dinamizada por la búsqueda de la racionalización de recursos.

REFERENCIAS



- Abbott J (2008) A packaging (pallet) example. What is a Carbon Footprint? The Edinburgh Centre for Carbon Management, Edinburgh, p 23
- Ackerman F, Ishikawa M, Suga M (2007) The carbon content of Japan–US trade. *Energy Policy* 35:4455–4462. doi: 10.1016/j.enpol.2007.03.010
- Acquaye AA, Wiedmann T, Feng K, et al. (2011) Identification of “carbon hot-spots” and quantification of GHG intensities in the biodiesel supply chain using hybrid LCA and structural path analysis. *Environ Sci Technol* 45:2471–8. doi: 10.1021/es103410q
- Agencia Tributaria (2010) Exportaciones. In: Base datos del Comer. Exter. <http://aduanas.camaras.org/>. Accessed 20 Jan 2014
- Ahmad N, Wyckoff A (2003) Carbon Dioxide Emissions Embodied in International Trade of Goods. *Technology*. doi: 10.1787/421482436815
- Aichele R, Felbermayr G (2011) Kyoto and the carbon footprint of nations. *J Environ Econ Manage*. doi: 10.1016/j.jeem.2011.10.005
- Alcorn JA (1998) Embodied Energy Coefficients of Building Materials. Wellington, NZ
- Alvarez S, Blanquer M, Rubio A (2014) Carbon footprint using the Compound Method based on Financial Accounts. The case of the School of Forestry Engineering, Technical University of Madrid. *J Clean Prod* 66:224–232
- Amarante OAC, Brower M, Zack J, Sá AL (2001) Atlas do potencial eólico brasileiro. Brasilia
- Andrew R, Peters GP, Lennox J (2009) Approximation and Regional Aggregation in Multi-Regional Input–Output Analysis for National Carbon Footprint Accounting. *Econ Syst Res* 21:311–335. doi: 10.1080/09535310903541751
- Arvesen A, Hertwich EG (2011) Environmental implications of large-scale adoption of wind power: a scenario-based life cycle assessment. *Environ Res Lett* 6:045102. doi: 10.1088/1748-9326/6/4/045102
- Arvesen A, Hertwich EG (2012) Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. *Renew Sustain Energy Rev* 16:5994–6006. doi: 10.1016/j.rser.2012.06.023
- Atif SM, Srivastav M, Sauyrbekova M, Arachchige UK (2012) Globalization and Income Inequality: A Panel Data Analysis of 68 Countries.
- Baboulet O, Lenzen M (2010) Evaluating the environmental performance of a university. *J Clean Prod* 18:1134–1141. doi: 10.1016/j.jclepro.2010.04.006



- Baird G, Alcorn A, Hons B, Haslam P (1997) The energy embodied in building materials - updated New Zealand coefficients and their significance. 24:46–54
- Ballantyne AP, Alden CB, Miller JB, et al. (2012) Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature* 488:70–2. doi: 10.1038/nature11299
- Barker S, Knorr G, Edwards RL, et al. (2011) 800,000 years of abrupt climate variability. *Science* 334:347–51. doi: 10.1126/science.1203580
- Barnthouse L, Fava J, Humphreys K, et al. (1989) Life-cycle Impact assessment: The State-of-the-Art. Pensacola
- Van den Bergh JCJ., Verbruggen H (1999) Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the “ecological footprint.” *Ecol Econ* 29:61–72
- Van den Bergh JCJ., Grazi F (2014) Ecological Footprint Policy? Land Use as an Environmental Indicator. *J Ind Ecol* 18:10–19. doi: 10.1111/jiec.12045
- Bilbao AM, Carrano AL, Hewitt M, Thorn BK (2011) On the environmental impacts of pallet management operations. *Manag Res Rev* 34:1222–1236. doi: 10.1108/01409171111178765
- Blanquer Rodríguez M (2012) Aproximación metodológica al cálculo de huella de carbono y huella ecológica en centros universitarios: el caso de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid
- El Bouazzaoui I, Gondran N, Bourgois J (2007) Ecological Footprint at a Small Scale : Proposition of a Method and Model of Representation of Ecological Footprint for Industrial Activities. *Informations Technol pour l’Environnement* 19
- Bowen A, Rydge J (2011) Climate change policy in the United Kingdom. *Econ Dep Work Pap No* 886 42
- British Standard Institute (2011) PUBLICLY AVAILABLE SPECIFICATION PAS 2050 : 2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services
- Brundtland GH (1987) *Our Common Future*. United Nations, Norway
- BSI (2008) PUBLICLY AVAILABLE SPECIFICATION PAS 2050 : 2008 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. October
- Bullard CW, Penner PS, Pilati DA (1978) Net energy analysis. *Handbook for combining process and input-output analysis. Resour Energy* 1:267–313



- Butchart SHM, Walpole M, Collen B, et al. (2010) Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science* (80-) 328:1164–8. doi: 10.1126/science.1187512
- Cagiao J, Gómez B, Doménech JL, et al. (2011) Calculation of the corporate carbon footprint of the cement industry by the application of MC3 methodology. *Ecol Indic* 11:1526–1540. doi: 10.1016/j.ecolind.2011.02.013
- Cagiao J, Labella Hidalgo S, Carballo-Penela A, Gómez Meijide B (2012) A New Perspective for Labeling the Carbon Footprint Against Climate Change. In: Singh DBR (ed) *Glob. Warm. - Impacts Futur. Perspect. InTech*, p 39
- Caldés N, Varela M, Santamaría M, Sáez R (2009) Economic impact of solar thermal electricity deployment in Spain. *Energy Policy* 37:1628–1636
- Camps Arbestain M, Barreal ME, Macías F (1999) Relating sulfate sorption in forest soils to lithological classes, as defined to calculate Critical Loads of Acidity. *Sci Total Environ* 241:181–195
- Carballo-Penela A (2009) La huella ecológica de bienes y servicios: desarrollo de un método de cálculo y aplicación al ciclo de vida del mejillón en conserva en Galicia. 629
- Carballo-Penela A, García-Negro MDC, Doménech JL (2009) A Methodological Proposal for Corporate Carbon Footprint and Its Application to a Wine-Producing Company in Galicia, Spain. *Sustainability* 1:302–318. doi: 10.3390/su1020302
- Carballo-Penela A (2010) Desarrollo sostenible y ecoetiquetado de bienes y servicios. 353
- Carballo-Penela A, Doménech J (2010) Managing the carbon footprint of products: the contribution of the method composed of financial statements (MC3). *Int J Life Cycle Anal* 3:962–969. doi: 10.1007/s11367-010-0230-1
- Carbonfeel (2013) Technical Committee. In: *Fund. Funciona.* http://www.carbonfeel.org/Carbonfeel_2/El_equipo.html. Accessed 10 Oct 2013
- Cardinale BJ, Duffy JE, Gonzalez A, et al. (2012) Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* 486:59–67. doi: 10.1038/nature11148
- CDP (Carbon Disclosure Project) (2013) *Global 500 Climate Change Report 2013*. 60.
- Cole MA (2004) Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: examining the linkages. *Ecol Econ* 48:71–81. doi: 10.1016/j.ecolecon.2003.09.007



- Commission Decision (2000) 2000/532/EC: Commission Decision of 3 May 2000 replacing Decision 94/3/EC establishing a list of wastes pursuant to Article 1(a) of Council Directive 75/442/EEC on waste and Council Decision 94/904/EC establishing a list of hazardous waste pursuant to Art
- Corbière-Nicollier T, Gfeller Laban B, Lundquist L, et al. (2001) Life cycle assessment of biofibres replacing glass fibres as reinforcement in plastics. *Resour Conserv Recycl* 33:267–287
- CORES (Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos) (2012) Resumen anual 2011, Ministerio
- Crawford RH (2009) Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. *Renew Sustain Energy Rev* 13:2653–2660. doi: 10.1016/j.rser.2009.07.008
- Cropper ML, Oates WE (1992) Environmental Economics: A Survey. *J Econ Lit* 30:675–740
- Chapagain AK, Hoekstra AY (2011) The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecol Econ* 70:749–758
- Chen B, Chen GQ (2007) Modified ecological footprint accounting and analysis based on embodied exergy—a case study of the Chinese society 1981–2001. *Ecol Econ* 61:355–376
- Chen ZM, Chen GQ (2010) Embodied Carbon Dioxide Emissions of the World Economy: A Systems Input-Output Simulation for 2004. *Procedia Environ Sci* 2:1827–1840. doi: 10.1016/j.proenv.2010.10.194
- Chenery H (1953) Regional analysis. *Struct. Growth Ital. Econ*
- Christiansen KE (1997) Simplifying LCA: Just a Cut? Brussels, Belgium
- Davis SJ, Caldeira K (2010) Consumption-based accounting of CO₂ emissions. *Proc Natl Acad Sci U S A* 107:5687–92. doi: 10.1073/pnas.0906974107
- Demir N, Taşkın A (2013) Life cycle assessment of wind turbines in Pınarbaşı-Kayseri. *J Clean Prod* 54:253–263. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.04.016
- Deng L, Babbitt CW, Williams ED (2011) Economic-balance hybrid LCA extended with uncertainty analysis: case study of a laptop computer. *J Clean Prod* 19(11), 1198–1206. doi:10.1016/j.jclepro.2011.03.004
- Dietzenbacher E, Stage J (2006) Mixing oil and water? Using hybrid input-output tables in a Structural decomposition analysis. *Econ Syst Res* 18:85–95. doi: 10.1080/09535310500440803
- Dissou Y, Eyland T (2011) Carbon control policies, competitiveness, and border tax



- adjustments. *Energy Econ* 33:556–564. doi: 10.1016/j.eneco.2011.01.003
- Dlugokencky EJ, Nisbet EG, Fisher R, Lowry D (2011) Global atmospheric methane: budget, changes and dangers. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* 369:2058–72. doi: 10.1098/rsta.2010.0341
- Doménech JL (2004) La huella ecológica empresarial: el caso del puerto de Gijón. *Actas él VII Congr. Nac. Medio Ambient*
- Doménech JL (2007) *Huella Ecológica y Desarrollo Sostenible*, AENOR. 398
- Doménech JL (2010) *Huella de carbono. Huella ecológica corporativa*. <http://www.jdomenech.com/bioamb/huellaeco.htm>. Accessed 30 Jan 2014
- Dreher A (2006) Does globalization affect growth? Evidence from a new index of globalization. *Appl Econ* 38:1091–1110
- Du H, Guo J, Mao G, et al. (2011) CO2 emissions embodied in China–US trade: Input–output analysis based on the emergy/dollar ratio. *Energy Policy* 39:5980–5987. doi: 10.1016/j.enpol.2011.06.060
- EC (Commission of the European Community) (2004) Commission Decision of 29 January 2004 establishing guidelines for the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council. *J Eur Union* 59:1–74
- ECCP (European Climate Change Programme) (2004) Working Group Sinks Related to Agricultural Soils. Final Report. Programa Eur. sobre el Cambio Climático (ECCP)
- ECCC (Energy and Climate Change Committee) (2012) Consumption-Based Emissions Reporting Volume I: Report, together with formal minutes, oral and written evidence. London
- Ecolabel Index (2014) Ecolabel Index | Who's deciding what's green? <http://www.ecolabelindex.com/>
- Emiliani ML, Stec DJ (2005) Wood pallet suppliers' reaction to online reverse auctions. *Supply Chain Manag An Int J* 10:278–287. doi: 10.1108/13598540510612758
- Van Engelenburg BCW, van Rossum TFM, Blok K, Vringer K (1994) Calculating the energy requirements of household purchases. *Energy Policy* 22:648–656
- Engström R, Wadeskog A, Finnveden G (2007) Environmental assessment of Swedish agriculture. *Ecol Econ* 60:550–563
- Ernst & Young France and Quantis (2010) *Product Carbon Footprinting – a Study on Methodologies and Initiatives*. 307



- Escuela Superior de Comercio Internacional - Universidad Pompeu Fabra, Cátedra UNESCO de Ciclo de Vida y Cambio Climático, Ecoembes, et al. (2013) FENIX – Giving Packaging a New Life. Manual del usuario. 76
- European Commission (2010) ILCD handbook. General guide for life cycle assessment—detailed guidance. [ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook- General-guide-for-LCA-DETAIL-online-12March2010.pdf](http://ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAIL-online-12March2010.pdf) (accessed 9.20.13)
- European Commission (2013a) Commission Recommendation (2013/179/EU) on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations. Annex II: Product Environmental Footprint (PEF) guide. Off J Eur Union. doi: 10.3000/19770677.L_2013.124.eng
- European Commission (2013b) Building the Single Market for Green Products. COM(2013) 196 final. 13
- European Parliament and Council (2011) Regulation (EU) No 691/2011 of the European Parliament and of the Council of 6 July 2011
- Eurostat (2008) Methodologies and Working papers Eurostat Manual of Supply , Use and Input-Output Tables 2008 edition. Office 592
- Fang K, Heijungs R, de Snoo GR (2014) Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: Overview of a footprint family. *Ecol Indic* 36:508–518
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2010) Global Forest Resources Assessment 2010 – main report. Rome
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2012) Factores de rendimiento. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura. <http://www.fao.org/corp/statistics/en/>. Accessed 3 Mar 2012
- Fava JA (1991) A Technical Framework for Life-cycle Assessment: Workshop Report. Vermont
- Feenstra RC (2003) Advanced International Trade: Theory and Evidence. 496
- FEMP (Federación Española de Municipios y Provincias) (2009) Red Española de Ciudades por el Clima
- FEMP (Federación Española de Municipios y Provincias) (2014) Red Española de Ciudades por el Clima
- Ferng J-J (2002) Toward a scenario analysis framework for energy footprints. *Ecol Econ* 40:53–69



- Fiala N (2008) Measuring sustainability: Why the ecological footprint is bad economics and bad environmental science. *Ecol Econ* 67:519–525.
- Finnveden G, Hauschild MZ, Ekvall T, et al. (2009) Recent developments in Life Cycle Assessment. *J Environ Manage* 91:1–21. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018
- Fischer H, Masson-Delmotte V, Waelbroeck C, et al. (2010) Glacial–interglacial and millennial-scale variations in the atmospheric nitrous oxide concentration during the last 800,000 years. *Quat Sci Rev* 29:182–192.
- Flanagan LB, Wever LA, Carlson PJ (2002) Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Glob Chang Biol* 8:599–615. doi: 10.1046/j.1365-2486.2002.00491.x
- Galli A, Wiedmann T, Ercin E, et al. (2012) Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a “Footprint Family” of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecol Indic* 16:100–112. doi: 10.1016/j.ecolind.2011.06.017
- Gasol CM, Farreny R, Gabarrell X, Rieradevall J (2008) Life cycle assessment comparison among different reuse intensities for industrial wooden containers. *Int J Life Cycle Assess* 13:421–431. doi: 10.1007/s11367-008-0005-0
- GHG Protocol (2014) Third Party Databases. Available. <http://www.ghgprotocol.org/Third-Party-Databases>. Accessed 20 Jan 2014
- Global Footprint Network (GFN) (2014) Glosario. <http://www.footprintnetwork.org/es/index.php/gfn/page/glossary/>. Accessed 30 Jan 2014
- González Berzosa Á (2013) Análisis de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero a lo largo del Ciclo de Vida de las Carreteras. 321.
- Graedel T, Allenby B (2010) *Industrial Ecology and Sustainable Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ
- Grande JA (2008) Plastic pallets gain ground in an Eco Conscious World. *Plast Technol* 54:58–65.
- Gsänger S, Pitteloud J-D (2013) World energy report 2012. 22. GTAP (Global Trade Analysis Project) (2007) GTAP 7 Database.
- Guinée JB, Gorée M, Heijungs R, et al. (2002) Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. 692.



- GWEC (Global Wind Energy Council) (2014) Global installed wind power capacity in 2013 - Regional Distribution. 1.
- Haes H a. U, Heijungs R, Suh S, Huppes G (2004) Three Strategies to Overcome the Limitations of Life-Cycle Assessment. *J Ind Ecol* 8:19–32. doi: 10.1162/1088198042442351
- Hanski I (2005) Landscape fragmentation, biodiversity loss and the societal response. The long term consequences of our use of natural resources may be surprising and unpleasant. *EMBO Rep* 6:388–92. doi: 10.1038/sj.embor.7400398
- Heijungs R (1994) A generic method for the identification of options for cleaner products. *Ecol Econ* 10:69–81.
- Heijungs R, Koning A, Suh S, Huppes G (2006) Toward an Information Tool for Integrated Product Policy: Requirements for Data and Computation. *J Ind Ecol* 10:147–158. doi: 10.1162/jiec.2006.10.3.147
- Hendrickson C, Horvath A, Joshi S, Lave L (1998) Peer Reviewed: Economic Input- Output Models for Environmental Life-Cycle Assessment. *Environ Sci Technol* 32:184A–191A. doi: 10.1021/es983471i
- Hendrickson CT, Lave LB, Matthews HS (2006) Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach. Routledge
- Hertel TW (1997) Global Trade Analysis: Modeling and Applications, Cambridge. Cambridge University Press
- Hertwich EG, Peters GP (2009) Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis. *Environ Sci Technol* 43:6414–6420. doi: 10.1021/es803496a
- Hischier R (2003) Session Packaging. Spec. LCA Discuss. Forum
- Hoekstra AY, Hung PQ (2002) Virtual Water Trade: A Quantification of Virtual Water Flows between Nations in Relation to International Crop Trade, Value of W.
- Hoesly R, Blackhurst M, Matthews HS, et al. (2012) Historical carbon footprinting and implications for sustainability planning: a case study of the Pittsburgh region. *Environ Sci Technol* 46:4283–4290. doi: 10.1021/es203943q
- Huang YA, Weber CL, Matthews HS (2009) Categorization of Scope 3 emissions for streamlined enterprise carbon footprinting. *Environ Sci Technol* 43:8509–15. doi: 10.1021/es901643a
- Huppes G, Schneider FE (1994) Proceedings of the European Workshop on Allocation in LCA at the Centre of Environmental Science (CML) of Leiden University. Leiden 24th and 25th of February 1994.



- IDAE (Instituto para la diversificación y el ahorro de Energía) (1989) Reducción del gasto energético en depuración, bombeo y suministro de agua. Madrid
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético) (2011) Factores de conversión Energía Final - Energía Primaria and Factores de emisión - 2010. 1.
- IFAD (International Fund for Agricultural Development) (2010) Desertification. 4.
- International Energy Agency (2013) Electricity Information 2012. 760. doi: 10.1787/electricity-2012-en
- International Journal of Architecture Engineering and Construction (IJAEC) (2014) IJAEC International Journal of Architecture, Engineering and Construction. <http://www.iasdm.org/journals/index.php/ijaec>. Accessed 20 Jan 2014
- International Society of Sustainability Professionals (ISSP) (2014) 2014 ISSP November conference Denver Colorado | International Society of Sustainability Professionals. <http://www.sustainabilityprofessionals.org/2014-issp-conference>. Accessed 20 Jan 2014
- International Sustainable Development Research Society (ISDRS) (2014) International Sustainable Development Research Society (ISDRS). <http://isdrs.org/>. Accessed 20 Jan 2014
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change. IGES – Japan
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2003) Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. 632.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006a) Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use. 2006 IPCC Guidel. Natl. Greenh. Gas Invent.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007a) The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007b) Climate change 2007: Mitigation. Clim Chang 2007 Mitigation 852.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006b) Volume 2 Energy. 2006 IPCC Guidel. Natl. Greenh. Gas Invent. p 319
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013a) Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (Ar5), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. 2216.



- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013b) IPCC Inventory Software User Manual Version 2.10. 57.
- Isard W (1951) Interregional and regional input-output analysis, a model of a space economy. *Rev Econ Stat* 33:318–328.
- Ismer R, Neuhoﬀ K (2004) Border Tax Adjustments: A feasible way to address nonparticipation in Emission Trading.
- ISO (International Organization for Standardization) (2003) ISO 6780:2003 - Flat pallets for intercontinental materials handling -- Principal dimensions and tolerances. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=30524. Accessed 10 Feb 2014
- ISO (International Organization for Standardization) (2006a) ISO 14040: 2006 - Environmental management - life cycle assessment - principles and framework.
- ISO (International Organization for Standardization) (2006b) ISO14064-1:2006 - Greenhouse gases. Part 1: Specification with Guidance at the Organization Level for Quantification and Reporting of Greenhouse Gas Emissions and Removals. Switzerland, Geneva
- ISO (International Organization for Standardization) (2013a) ISO/TS 14067:2013 Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication. 52.
- ISO (International Organization for Standardization) (2013b) ISO/TR 14069:2013 - Greenhouse gases - Quantification and reporting of greenhouse gas emissions for organizations - Guidance for the application of ISO 14064-1. 88.
- IVEM (1999) Interfacultaire Vakgroep Energie en Milieukunde. Groningen, NL.
- Jean-Marc Burniaux and Truong P. Truong (2008) GTAP-E: An Energy-Environmental Version of the GTAP Model. GTAP Technical Paper No. 16. 69.
- JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE (2014) Downloads | JEC research collaboration. <http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/downloads>. Accessed 27 Feb 2014
- Jorgenson AK (2009) The Transnational Organization of Production , the Scale of Degradation , and Ecoefficiency : A Study of Carbon Dioxide Emissions in Less-Developed Countries. *Hum Ecol Rev* 16:64–74.
- Joshi S (1999) Product Environmental Life-Cycle Assessment Using Input-Output Techniques. *J Ind Ecol* 3:95–120. doi: 10.1162/108819899569449
- JRC-IES (Joint Research Center - Institute for Environmental and Sustainability) (2010) International Reference Life Cycle Data System. ILCD Handbook.



- Kallis G, Schneider F, Martinez-Alier J, Schneider F (2010) Crisis or opportunity? Economic degrowth for social equity and ecological sustainability. Introduction to this special issue. *J Clean Prod* 18:511–518.
- Kellenberger D, Althaus H, Jungbluth N, Künniger T (2007) Anthology Final report ecoinvent data v2.0 . Life Cycle Inventories of Building Products. Dübendorf
- Kitzes J, Wackernagel M (2009) Answers to common questions in Ecological Footprint accounting. *Ecol Indic* 9:812–817. doi: 10.1016/j.ecolind.2008.09.014
- Klemeš J, Čuček L, Klemeš JJ, Kravanja Z (2012) A Review of Footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability. *J Clean Prod* 34:9–20.
- Kondo Y, Moriguchi Y, Shimizu H (1998) CO2 Emissions in Japan: Influences of imports and exports. *Appl Energy* 59:163–174. doi: 10.1016/S0306-2619(98)00011-7
- Kubiszewski I, Cleveland CJ, Endres PK (2010) Meta-analysis of net energy return for wind power systems. *Renew Energy* 35:218–225. doi: 10.1016/j.renene.2009.01.012
- De la Cruz Leiva JL, Carballo-Penela A, Domenech JL (2011) Enfoques metodológicos para el cálculo de la Huella de Carbono. In: *Obs. la Sostenibilidad España*. http://www.sostenibilidad-es.org/sites/default/files/_Documentos/herramientas.pdf.
- De la Rúa Lope C (2009) Desarrollo de la Herramienta Integrada “Análisis de Ciclo de Vida –Input Output” para España. Aplicación a Tecnologías Energéticas Avanzadas. 264.
- Laurent A, Olsen SI, Hauschild MZ (2012a) Limitations of carbon footprint as indicator of environmental sustainability. *Environ Sci Technol* 46:4100–4108. doi: 10.1021/es204163f
- Laurent A, Olsen SI, Hauschild MZ (2012b) Limitations of carbon footprint as indicator of environmental sustainability. *Environ Sci Technol* 46:4100–8. doi: 10.1021/es204163f
- Lave LB, Cobas-Flores E, Hendrickson CT, McMichael FC (1995) Using input-output analysis to estimate economy-wide discharges. *Environ Sci Technol* 29:420A– 426A. doi: 10.1021/es00009a003
- Leach AM, Galloway JN, Bleeker A, et al. (2012) A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment. *Environ Dev* 1:40–66.



- Lee C-H, Ma H-W (2012) Improving the integrated hybrid LCA in the upstream scope 3 emissions inventory analysis. *Int J Life Cycle Assess* 18:17–23. doi: 10.1007/s11367-012-0469-9
- Lenzen M (1998) Primary energy and greenhouse gases embodied in Australian final consumption: an input–output analysis. *Energy Policy* 26:495–506. doi: 10.1016/S0301-4215(98)00012-3
- Lenzen M (2000) Errors in Conventional and Input-Output–based Life–Cycle Inventories. *J Ind Ecol* 4:127–148. doi: 10.1162/10881980052541981
- Lenzen M, Munksgaard J (2002) Energy and CO₂ life-cycle analyses of wind turbines—review and applications. *Renew Energy* 26:339–362. doi: 10.1016/S0960-1481(01)00145-8
- Lenzen M (2002) Differential Convergence of Life-Cycle Inventories toward Upstream Production Layers. *Journal of Industrial Ecology*, 6(3-4), 137–160. doi:10.1162/108819802766269575
- Lenzen M, Wachsmann U (2004) Wind turbines in Brazil and Germany: an example of geographical variability in life-cycle assessment. *Appl Energy* 77:119–130.
- Lenzen M (2007) Structural path analysis of ecosystem networks. *Ecol Modell* 200:334–342.
- Lenzen M, Crawford R (2009) The path exchange method for hybrid LCA. *Environ Sci Technol* 43:8251–6. doi: 10.1021/es902090z
- Lenzen M, Wood R, Wiedmann T (2010) Uncertainty Analysis for Multi-Region Input–Output Models – a Case Study of the UK’S Carbon Footprint. *Econ Syst Res* 22:43–63. doi: 10.1080/09535311003661226
- Lenzen M (2011) Aggregation Versus Disaggregation in Input–Output Analysis of the Environment. *Econ Syst Res* 23:73–89. doi: 10.1080/09535314.2010.548793
- Lenzen M, Kanemoto K, Moran D, Geschke A (2012) Mapping the structure of the world economy. *Environ Sci Technol* 46:8374–8381. doi: 10.1021/es300171x
- Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, Geschke A (2013) Building Eora: A Global Multi-regional Input-Output Database at High Country and Sector Resolution. *Econ Syst Res* 25:20–49. doi: 10.1080/09535314.2013.769 938
- Leontief W (1936) Quantitative Input-Output Relations in the Economic System of the United States. *Rev. Econ. Stat.* 3:
- Leontief W (1941) *The Structure of the American Economy*. Oxford Univ Press. doi: 10.2307/1928349
- Leontief WW (1953) *Domestic Production and Foreign Trade: The American Capital*



- Position Re-examined. *Proc Am Philos Soc* 97:332–49.
- Leung DY, Yang Y (2012) Wind energy development and its environmental impact: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 16:1031–1039. doi: 10.1016/j.rser.2011.09.024
- Limmechokchai B, Suksuntornsiri P (2007) Embedded energy and total greenhouse gas emissions in final consumptions within Thailand. *Renew Sustain Energy Rev* 11:259–281.
- Lovelock JE (1985) *GAIA, Una nueva visión de la vida sobre la Tierra*. 44.
- Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, et al. (2008) High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature* 453:379–82. doi: 10.1038/nature06949
- Llorente Díaz I, Vignote Peña S, Martínez Rojas I, Moro Coco O (2013) Análisis del ciclo de vida de la ventana de madera 6CFE01–558. VI Congr. For. Español. Vitoria, p 14
- Machado G, Schaeffer R, Worrell E (2001) Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil: an input–output approach. *Ecol Econ* 39:409–424. doi: 10.1016/S0921-8009(01)00230-0
- Mäenpää I, Siikavirta H (2007) Greenhouse gases embodied in the international trade and final consumption of Finland: An input–output analysis. *Energy Policy* 35:128–143. doi: 10.1016/j.enpol.2005.10.006
- MAGRAMA (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente) (2014) Convocatoria 2014 para la selección de Proyectos Clima. <http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/fondo-carbono/Convocatoria-2014-proyectos-clima.aspx>. Accessed 3 Mar 2014
- Majeau-Bettez G, Strømman AH, Hertwich EG (2011) Evaluation of process- and input-output-based life cycle inventory data with regard to truncation and aggregation issues. *Environ Sci Technol* 45:10170–10177. doi: 10.1021/es201308x
- Marañón E, Iregui G, Domenech JL, et al. (2008) Propuesta de índices de conversión para la obtención de la huella de los residuos y los vertidos. *OIDLES* 4:26.
- Marsh-Patrick A (2010) Company GHG Emissions Reporting – a Study on Methods and Initiatives. *Initiatives* 239.
- Martínez-Alier J, Munda G, O'Neill J (1998) Weak comparability of values as a foundation for ecological economics. *Ecol Econ* 26:277–286.
- Matthews HS, Hendrickson CT, Weber CL (2008) The importance of carbon footprint estimation boundaries. *Environ Sci Technol* 42:5839–42.
- Mazeika A (2011) Environmental Impact Analysis of Alternative Pallet Management



- Systems. 159.
- Meadows DH, Meadows DL, Randers J, Behrens III WW (1972) Limits to Growth, New Americ. New York
- Meier P, Wilson P, Kulcinski G, Denholm P (2005) US electric industry response to carbon constraint: a life-cycle assessment of supply side alternatives. Energy Policy 33:1099–1108. doi: 10.1016/j.enpol.2003.11.009
- Miller RE, Blair PD (2009) Input-Output Analysis: Foundations and Extensions, 2nd Edition. 784.
- Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) (2008) Sistema Compromisos Voluntarios y de Reducción de Emisiones de GEI. 20.
- Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) (2014) Real Decreto 163/2014 crea registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de CO₂. 16.
- Ministerio de Economía y Hacienda (2007) REAL DECRETO 1514/2007, de 16 de noviembre, por el que se aprueba el Plan General de Contabilidad. 152.
- Minx JC, Wiedmann T, Wood R, et al. (2009) Input–Output Analysis and Carbon Footprinting: an Overview of Applications. Econ Syst Res 21:187–216. doi: 10.1080/09535310903541298
- Minx JC, Guan D (2010) Input – Output Analysis And Carbon Footprinting : An Overview Of Applications. Econ Syst 37–41. doi: 10.1080/09535310903541298
- Monfreda C, Wackernagel M, Deumling D (2004) Establishing national natural capital accounts based on detailed Ecological Footprint and biological capacity assessments. Land use policy 21:231–246.
- Mongelli I, Tassielli G, Notarnicola B (2006) Global warming agreements, international trade and energy/carbon embodiments: an input–output approach to the Italian case. Energy Policy 34:88–100. doi: 10.1016/j.enpol.2004.06.004
- Monjon S, Quirion P (2010) How to design a border adjustment for the European Union Emissions Trading System? Energy Policy 38:5199–5207. doi: 10.1016/j.enpol.2010.05.005
- Moriguchi Y, Kondo Y, Shimizu H (1993) Analysing the life cycle impacts of cars: The case of CO₂. Ind. Environ. 16:
- Moses L (1955) The stability of interregional trading patterns amnd input-output analysis. Am Econ Rev 45:803–832.



- Munksgaard J, Pedersen KA (2001) CO₂ accounts for open economies: producer or consumer responsibility? *Energy Policy* 29:327–334. doi: 10.1016/S0301-4215(00)00120-8
- Murray E (2010) There is evidence that Product Carbon Footprint labels help reduce greenhouse gas emissions across product lifecycles. Does Carbon Label. Work.
- Narayanan G, Badri AA, McDougall R (2012) Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 8 Data Base.
- Ng R, Shi CWP, Tan HX, Song B (2013) Avoided impact quantification from recycling of wood waste in Singapore: an assessment of pallet made from technical wood versus virgin softwood. *J Clean Prod* 1–11. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.07.053
- O'Neill DW, Dietz R, Jones N (2010) Enough is Enough: Ideas for a sustainable economy in a world of finite resources. *Steady State Econ. Conf.*
- Oebels KB, Pacca S (2013) Life cycle assessment of an onshore wind farm located at the northeastern coast of Brazil. *Renew Energy* 53:60–70. doi: 10.1016/j.renene.2012.10.026
- Panko, J., Hitchcock K (2011) Chemical Footprint Ensuring Product Sustainability. 12– 15.
- Peters GP (2006) Efficient algorithms for Life Cycle Assessment, Input-Output Analysis, and Monte-Carlo Analysis. *Int J Life Cycle Assess* 12:373–380. doi: 10.1065/lca2006.06.254
- Peters GP, Hertwich EG (2006a) The importance of imports for household environmental impacts. *J Ind Ecol* 10 :89–109.
- Peters GP, Hertwich EG (2006b) Structural analysis of international trade : Environmental impacts of Norway Structural Analysis of International Trade : Environmental Impacts of Norway. *Econ Syst Res* 18(2):155–181.
- Peters GP, Weber CL, Guan D, Hubacek K (2007) China's Growing CO₂ Emissions A Race between Increasing Consumption and Efficiency Gains. *Environ Sci Technol* 41:5939–5944. doi: 10.1021/es070108f
- Peters GP, Hertwich EG (2008) CO₂ Embodied in International Trade with Implications for Global Climate Policy. *Environ Sci Technol* 42:1401–1407. doi: 10.1021/es072023k
- Peters GP, Marland G, Hertwich EG, et al. (2009) Trade, transport, and sinks extend the carbon dioxide responsibility of countries: An editorial essay. *Clim Change* 97:379–388. doi: 10.1007/s10584-009-9606-2



- Peters G, Solli C (2010) Global carbon footprints. Methods and import/export corrected results from the Nordic countries in global footprint studies. 133.
- Peters GP (2010) Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. *Curr Opin Environ Sustain* 2:245–250. doi: 10.1016/j.cosust.2010.05.004
- Peters GP, Andrew R, Lennox J (2011) Constructing an Environmentally-Extended Multi-Regional Input–Output Table Using the Gtap Database. *Econ Syst Res* 23:131–152. doi: 10.1080/09535314.2011.563234
- PNUMA (2006) Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono. 518.
- Polenske KR (1989) Historical and new international perspectives on input-output accounts. *Front. Input-Output Anal.*
- Prather MJ, Holmes CD, Hsu J (2012) Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry. *Geophys Res Lett* 39:n/a–n/a. doi: 10.1029/2012GL051440
- Quiroga MR (2007) Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe, Manuales n. 228.
- Raadal HL, Gagnon L, Modahl IS, Hanssen OJ (2011) Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. *IPCC Spec Rep Renew Sustain energy Rev* 15:3417–3422. doi: 10.1016/j.rser.2011.05.001
- Raupach MR, Marland G, Ciais P, et al. (2007) Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. *Proc Natl Acad Sci U S A* 104:10288–93. doi: 10.1073/pnas.0700609104
- RD 163/2014 (2014) Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono. 16.
- Rivers A (2012) Nitrogen trifluoride: the new mandatory Kyoto Protocol greenhouse gas. In: *Ecometrica.com*. <http://ecometrica.com/blog/nitrogen-trifluoride-the-7th-mandatory-kyoto-protocol-greenhouse-gas>. Accessed 20 Jan 2014
- Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature* 461:472–475. doi: 10.1038/461472a
- Rodríguez-Lado L, Macías F (2006) Calculation and mapping of critical loads of sulphur and nitrogen for forest soils in Galicia (NW Spain). *Sci Total Environ* 366:760–771.



- Rosa EA, Dietz T (2012) Human drivers of national greenhouse-gas emissions. *Nat Clim Chang* 2:581–586. doi: 10.1038/nclimate1506
- Rowley H V., Lundie S, Peters GM (2009) A hybrid life cycle assessment model for comparison with conventional methodologies in Australia. *Int J Life Cycle Assess* 14:508–516. doi: 10.1007/s11367-009-0093-5
- Sabine CL, Feely RA, Gruber N, et al. (2004) The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305:367–71. doi: 10.1126/science.1097403
- Sánchez-Chóliz J, Duarte R (2004) CO₂ emissions embodied in international trade: evidence for Spain. *Energy Policy* 32:1999–2005. doi: 10.1016/S0301-4215(03)00199-X
- Scipioni A, Manzardo A, Mazzi A, Mastrobuono M (2012) Monitoring the carbon footprint of products: a methodological proposal. *J Clean Prod* 36:94–101.
- Schaltegger S, Csutora M (2012) Carbon accounting for sustainability and management. Status quo and challenges. *J Clean Prod* 36:1–16.
- Schmincke E, Capello C, Holmquist L, et al. (2007) PCR 2004:02 Electricity and district heating generation.
- Schneider H, Samaniego J (2009) La huella del carbono en la producción , distribución y consumo de bienes y servicios, Comisión E. 46.
- Seitzinger S (2010) A sustainable planet needs scientists to think ahead. *Nature* 468:601. doi: 10.1038/468601a
- Serrano M, Dietzenbacher E (2010) Responsibility and trade emission balances: An evaluation of approaches. *Ecol Econ* 69:2224–2232. doi: 10.1016/j.ecolecon.2010.06.008
- SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) (1990) Life Cycle Analysis for Packaging Environmental Assessment Proceedings of the Specialised Workshop. Leuven, Belgium
- SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) (1993) Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice. Brussels, Belgium.
- Seigné Itoiz E, Gasol C., Farreny R, et al. (2013) CO₂ZW: Carbon footprint tool for municipal solid waste management for policy options in Europe. Inventory of Mediterranean countries. *Energy Policy* 56:623–632. doi: 10.1016/j.enpol.2013.01.027
- Simmons C, González I, Lewis K, et al. (2006) gy for determining global sectoral material consumption, carbon dioxide emissions and Ecological Footprints. In:



- WWF, One Planet Bus.
http://www.bestfootforward.com/media/upload/images/casestudy/methodology_report_wwf_one_planet_business.pdf (accessed 9.4.13).
- Singh SP, Walker R (1995) Life cycle analysis of nestable plastic and wood pallets. *J Plast Film Sheeting* 11:312–325.
- Son S-W, Polvani LM, Waugh DW, et al. (2008) The impact of stratospheric ozone recovery on the Southern Hemisphere westerly jet. *Science* 320:1486–9. doi: 10.1126/science.1155939
- Soussana JF, Pilegaard K, Ambus P, et al. (2004) Annual greenhouse gas balance of European grasslands. *Greenh Gas Emiss from Agric Options Strateg Conference*:25–30.
- Spadaro V, Langlois L, Hamilton B (2000) Greenhouse gas emissions of electricity generation chains: assessing the difference. *IAEA Bull* 42:
- Spath PL, Mann MK (2004) Biomass Power and Conventional Fossil Systems with and without CO₂ Sequestration – Comparing the Energy Balance, Greenhouse Gas Emissions and Economics Biomass Power and Conventional Fossil Systems with and without CO₂ Sequestration – Comparing the Ene. Contract
- Sreenual B, Atong D, Pechyen C (2012) Surface Degradation and Mechanical Properties of PVC/Wood-Pallet Composite under UV-Weathering Environment. *Adv Mater Res* 506:548–551. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.506.548
- Strømman AH, Peters GP, Hertwich EG (2009) Approaches to correct for double counting in tiered hybrid life cycle inventories. *J Clean Prod* 17:248–254.
- Su B, Ang BW (2011) Multi-region input–output analysis of CO₂ emissions embodied in trade: The feedback effects. *Ecol Econ*. doi: 10.1016/j.ecolecon.2011.08.024
- Suh S (2003) Input-output and hybrid life cycle assessment. *Int J Life Cycle Assess* 8:257–257. doi: 10.1007/BF02978914
- Suh S, Huppes G (2002) Missing inventory estimation tool using extended input-output analysis. *Int J Life Cycle Assess* 7:134–140. doi: 10.1007/BF02994047
- Suh S (2004) Functions, commodities and environmental impacts in an ecological–economic model. *Ecol Econ* 48:451–467.
- Suh S, Lenzen M, Treloar GJ, et al. (2004) System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches. *Environ Sci Technol* 38:657–664. doi: 10.1021/es0263745
- Suh S, Huppes G (2005a) Methods for Life Cycle Inventory of a product. *J Clean Prod* 13:687–697. doi: 10.1016/j.jclepro.2003.04.001



- Suh S, Huppel G (2005b) Methods for Life Cycle Inventory of a product. *J Clean Prod* 13:687–697.
- Suh S, Nakamura S (2007) Five years in the area of input-output and hybrid LCA. *Int J Life Cycle Assess* 12:351–352. doi: 10.1065/lca2007.08.358
- Suh S, Lippiatt BC (2012) Framework for hybrid life cycle inventory databases: a case study on the Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES) database. *Int J Life Cycle Assess* 17:604–612. doi: 10.1007/s11367-012-0393-z
- Timmer MP (2012) The World Input-Output Database (WIOD): Contents, Sources and Methods WIOD Working Paper Number 10.
- Treloar G (1997) Extracting Embodied Energy Paths from Input-Output Tables: Towards an Input-Output-based Hybrid Energy Analysis Method. *Econ Syst Res* 9:375–391. doi:10.1080/09535319700000032
- Tukker A (2011) EXIOPOL: towards a global Environmentally Extended Input-Output Table. *GTAP 2008 Conf. Helsinki, Finland*, p 22
- Tukker A, de Koning A, Wood R, et al. (2013) Price corrected domestic technology assumption--a method to assess pollution embodied in trade using primary official statistics only. With a case on CO₂ emissions embodied in imports to Europe. *Environ Sci Technol* 47:1775–83. doi: 10.1021/es303217f
- Tunç Gİ, Türüt-Aşık S, Akbostancı E (2007) CO₂ emissions vs. CO₂ responsibility: An input-output approach for the Turkish economy. *Energy Policy* 35:855–868. doi: 10.1016/j.enpol.2006.02.012
- UN Comtrade (2013) United Nations Commodity Trade Statistics Database. <http://comtrade.un.org/db/>. Accessed 20 Jan 2014
- UNEP/IISD (2005) *Environment and Trade: A Handbook*, Second edi. 142.
- United Nations (1998) *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. 21.
- United Nations (2014) UNdata | record view | Merchandise trade (% of GDP). http://data.un.org/Data.aspx?q=world+datamart%25bWDI%25d&d=WDI&f=Indicator_Code%253aTG.VAL.TOTL.GD.ZS%253bCountry_Code%252cWLD. Accessed 31 Jan 2014
- UNSTATS (United Nations Statistics Division) (2014) Detailed structure and explanatory notes. ISIC Rev.1. In: United Nations Stat. Comm. <http://unstats.un.org/unsd/cr/registry/regcst.asp?Cl=15&Lg=1>. Accessed 2 Feb 2014



- Velders GJM, Fahey DW, Daniel JS, et al. (2009) The large contribution of projected HFC emissions to future climate forcing. *Proc Natl Acad Sci U S A* 106:10949–54. doi: 10.1073/pnas.0902817106
- Van Vuuren DP, Hoogwijk M, Barker T, et al. (2009) Comparison of top-down and bottom-up estimates of sectoral and regional greenhouse gas emission reduction potentials. *Energy Policy* 37:5125–5139. doi: 10.1016/j.enpol.2009.07.024
- Wackernagel M, Rees WE (1996) *Our Ecological Footprint*. New Soc Publ 160.
- Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. (1999) National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecol Econ* 29:375–390.
- Wackernagel M, Dholakia R, Deumling D, Richardson D (2000) Assess your Household's Ecological Footprint 2.0. http://greatchange.org/ng-footprint-ef_household_evaluation.xls. Accessed 5 Oct 2012
- Wackernagel M, Schulz NB, Deumling D, et al. (2002) Tracking the ecological overshoot of the human economy. *Proc Natl Acad Sci U S A* 99:9266–9271. doi: 10.1073/pnas.142033699
- Wackernagel M, Monfreda C, Moran D, et al. (2005) National Footprint and Biocapacity Accounts 2005: The underlying calculation method. *Glob Footpr Netw* 33.
- Waggoner PE, Ausubel JH (2002) A framework for sustainability science : A renovated IPAT identity Dimensions Make an Iron Framework from Forces to Impact. *Proc Natl Acad Sci U S A* 99:7860–7866.
- Wang F, Sims JT, Ma L, et al. (2011) The phosphorus footprint of China's food chain: implications for food security, natural resource management, and environmental quality. *J Environ Qual* 40:1081–9. doi: 10.2134/jeq2010.0444
- Web of Science (2014) Search by topic. <https://www.accesowok.fecyt.es/?> Accessed 20 Jan 2014
- Weber C, Matthews H (2008) Quantifying the global and distributional aspects of American household carbon footprint. *Ecol Econ* 66:379–391. doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.09.021
- Weber C, Peter G p. (2009) Climate change policy and international trade: Policy considerations in the US. *Energy Policy* 37:432–440. doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.073
- Weidema BP, Thrane M, Christensen P, et al. (2008) Carbon Footprint. *J Ind Ecol* 12:3– 6. doi: 10.1111/j.1530-9290.2008.00005.x



- Weinzettel J, Kovanda J (2009) Assessing Socioeconomic Metabolism Through Hybrid Life Cycle Assessment. *J Ind Ecol* 13:607–621. doi: 10.1111/j.1530-9290.2009.00144.x
- Weinzettel J, Steen-olsen K, Galli A, et al. (2011) Footprint Family Technical Report : Integration into MRIO model OPEN : EU Footprint Family Technical Report : Integration into MRIO model. Framework 61.
- Weisser D (2007) A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy* 32:1543–1559. doi: 10.1016/j.energy.2007.01.008
- Wiedmann T, Lenzen M, Turner K, Barrett J (2007) Examining the global environmental impact of regional consumption activities — Part 2: Review of input–output models for the assessment of environmental impacts embodied in trade. *Ecol Econ* 61:15–26. doi: 10.1016/j.ecolecon.2006.12.003
- Wiedmann T, Minx J (2008) A Definition of “ Carbon Footprint .”C. C. Pertsova, *Ecol. Econ. Res. Trends* Chapter 1, pp. 1-11
- Wiedmann T (2009) A review of recent multi-region input–output models used for consumption-based emission and resource accounting. *Ecol Econ* 69:211–222. doi: 10.1016/j.ecolecon.2009.08.026
- Wiedmann T, Wood R, Minx JC, et al. (2010) a Carbon Footprint Time Series of the Uk – Results From a Multi-Region Input–Output Model. *Econ Syst Res* 22:19–42. doi: 10.1080/09535311003612591
- Wiedmann T, Barrett J (2011) A greenhouse gas footprint analysis of UK Central Government, 1990–2008. *Environ Sci Policy* 14:1041–1051. doi: 10.1016/j.envsci.2011.07.005
- Wiedmann T, Suh S, Feng K, et al. (2011a) Application of Hybrid Life Cycle Approaches to Emerging Energy Technologies À The Case of Wind Power in the UK. *Environ Sci Technol* 45:5900–5907. doi: 10.1021/es2007287
- Wiedmann T, Wilting HC, Lenzen M, et al. (2011b) Quo Vadis MRIO? Methodological, data and institutional requirements for multi-region input–output analysis. *Ecol Econ* 70:1945–1937. doi: 10.1016/j.ecolecon.2011.06.014
- Wiedmann T, Barrett J (2013) Policy-relevant applications of environmentally extended mrio databases – experiences from the UK. *Econ Syst Res* 25:143–156.
- Wiedmann TO, Schandl H, Lenzen M, et al. (2013) The material footprint of nations. doi: 10.1073/pnas.1220362110
- Wiser R, Yang Z, Hand M, et al. (2011) Wind energy. IPCC Spec. Rep. Renew. energy sources Clim. Chang. Mitig.



- World Bank (2009) Gini coefficient. In: World Dev. Indic. Cover. 209 Ctries. from 1960 to 2009. <http://data.worldbank.org/country/mexico>. Accessed 5 May 2013
- World Bank (2013) Poverty and Inequality Database. In: World DataBank. <http://data.worldbank.org/indicator/SI.POV.GAPS>. Accessed 12 Dec 2013
- WRI (World Resource Insititute), WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) (2004) The GHG Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard. USA
- WRI (World Resources Institute) (2005) Appendix 2: Navigating the Numbers. Greenh. Gas Data Int. Clim. Policy
- WRI (World Resources Institute), ICLEI – Local Governments for Sustainability, C40 Cities Climate Leadership Group, World Bank, UN-HABITAT and United Nations Environment Program. <http://www.ghgprotocol.org/city-accounting>. Accessed 12 Dec 2013
- WRI and WBCSD (World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development) (2011a) Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard.
- WRI and WBCSD (World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development) (2011b) Greenhouse Gas Protocol, Corporate Value Chain (scope 3) Accounting and reporting Standard. 152.
- WRI and WBCSD (World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development) (2011c) Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard. 148.
- WWF (World Wildlife Fund) (2004) Living Planet Report 2004.
- WWF (World Wildlife Fund), Agency), ZSL (Zoological Society of London), et al. (2012) Living Planet Report. http://awsassets.panda.org/downloads/1lpr2012online_full_size_singlepages_final_120516.pdf/.
- Wyckoff AW, Roop JM (1994) The embodiment of carbon in imports of manufactured products. *Energy Policy* 22:187–194. doi: 10.1016/0301-4215(94)90158-9
- Xu T, Galama T, Sathaye J (2013) Reducing carbon footprint in cement material making: Characterizing costs of conserved energy and reduced carbon emissions. *Sustain Cities Soc* 9:54–61. doi: 10.1016/j.scs.2013.03.002
- Yaap B, Struebig MJ, Paoli G, Pin Koh L (2010) Mitigating the biodiversity impacts of oil palm development, *CAB Review*.
- Yang Q, Chen GQ, Liao S, et al. (2013) Environmental sustainability of wind power: An emergy analysis of a Chinese wind farm. *Renew Sustain Energy Rev* 25:229–239.



doi: 10.1016/j.rser.2013.04.013

YCELP/CIESIN (Yale Center for Environmental Law and Policy and Center for International Earth Science Information Network) (2005) 2005 Environmental Sustainability Index, Benchmarking National Environmental Stewardship.

Zhao S, Li Z, Li W (2005) A modified method of ecological footprint calculation and its application. *Ecol Modell* 185:65–75.

ANEXOS



ANEXO I: Fases del Método Compuesto de las Cuentas Contables

1. Análisis de antecedentes	iv
2. Definición de objetivo y alcance.....	iv
3. Determinación de límites del sistema	iv
4. Análisis de inventarios	iv
5. Análisis de ciclo de vida.....	vi
6. Cálculo de Huella de Carbono y Huella Ecológica Corporativa	vi
7. Cálculo de Huella de Carbono y Huella Ecológica de Producto	vii
8. Interpretación de resultados y evaluación de la incertidumbre	vii
9. Análisis de alternativas y propuestas de mejoras.....	vii
10. Informe de Huella de Carbono	viii



1. Análisis de antecedentes

Se efectúa la búsqueda de estudios relacionadas con el sector que hayan calculado la HC con anterioridad. Si la empresa hubiese realizado algún estudio previo deberá ser analizado. Es muy importante revisar la literatura con el objetivo de encontrar “*Reglas de Categoría de Producto*” ya publicadas.

2. Definición del objetivo y del alcance

Se define el objetivo del cálculo de la HC así como las consideraciones más relevantes sobre el alcance. Entre estas consideraciones se debe definir: Año de estudio, unidad funcional, características del sistema producto, procedimiento para la recopilación de datos y criterios de calidad en datos.

3. Determinación de límites del sistema

Siempre que se realiza un proyecto de la HC deben quedar perfectamente fijadas las fronteras del estudio. Para ello, previo a cualquier tipo de recogida de datos y cálculos, se debe establecer los límites físicos, organizacionales y operacionales. Es decir, se fijan las fuentes y sumideros de emisiones de GEI determinando las que son de control directo de la empresa y las que son de control indirecto.

4. Análisis de inventarios

Los inventarios de GEI son una recopilación de la cantidad de emisiones y/o absorciones de GEI emitidas o absorbidas por una organización a partir de sus fuentes



o sumideros de GEI durante un periodo de tiempo específico. Sirven para entender cuáles son las fuentes de emisión, cuantificar dichas emisiones y medir tendencias de emisión. Además son una herramienta de gestión que facilita la identificación de oportunidades y el desarrollo de políticas de reducción de las mismas (INERCO-NOVOTEC-AENA 2010). La realización de un inventario de GEI es una actuación recomendable para las organizaciones que desean manifestar un compromiso con el medio ambiente en función de la actividad que desarrollan (AENOR 2013).

De acuerdo con la propuesta del MC3 se deben realizar al menos los siguientes inventarios:

Inventario de usos del suelo: Se analiza la superficie propiedad de la organización estudiada y se clasifica según las cinco categorías de superficie biológicamente productivas consideradas tanto en la elaboración de los inventarios nacionales de GEI (IPCC 2006) como por la Global Footprint Network (Wackernagel et al. 2005).

Inventario de gestión de residuos: Se solicita la cantidad de residuos generada anualmente de acuerdo con la clasificación presente en la Decisión de la Comisión Europea (2000) adaptada por el método MC3 para contemplar los residuos no peligrosos, los peligrosos y los vertidos. Por tanto, se deberá informar de la generación de residuo sólido urbano y su fracción selectiva (envases ligeros, papel y cartón, vidrio) y por último los posibles residuos de construcción y demolición.

Inventario de consumos: Se solicitan todos los consumos derivados de la actividad de la empresa, correspondientes al año en estudio. Estos consumos se recogen de forma general en euros, y serán transformados a unidades físicas a través



de la herramienta MC3. Esto no quiere decir que exclusivamente se recojan datos económicos ya que en ocasiones, como por ejemplo con la electricidad o los combustibles, se recomienda que sean recogidos en unidades físicas o energéticas. En los casos para los que el desglose de gastos e inversiones esté muy agregado se solicitará su separación a fin de reflejar de manera fehaciente la actividad real de la empresa.

Otros Inventarios: En función del objetivo y del alcance del estudio se podrá decidir la realización de nuevos inventarios. Estos inventarios permiten dar profundidad y considerar nuevos criterios de análisis. Por ejemplo, si se desea considerar el carbono almacenado en la madera se deberá realizar un inventario específico sobre el carbono a lo largo del ciclo de vida de la madera.

5. Análisis de ciclo de vida

Para el desarrollo de la siguiente fase se recomienda realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) parcial, considerando las fases del ciclo de vida “de la cuna a la puerta”. Durante esta fase se estudia de forma pormenorizada el sistema producto a fin de elaborar un mapa de procesos que tenga como resultado la determinación del flujo de referencia. Es decir, entradas y salidas para la obtención de la unidad funcional objeto de estudio. En este mapa se determinan fases, procesos y subprocesos del ciclo de vida. Además se deben definir los criterios para la asignación de cargas entre procesos compartidos con otros productos.

6. Cálculo de la Huella de Carbono y la Huella Ecológica Corporativa



Se calculan las emisiones y absorciones de GEI derivados de la actividad de la empresa. El proceso de cálculo permite obtener una medida de la energía primaria necesaria (expresada en gigajulios) así como las demandas de superficie biológicamente productiva. Mediante los factores de transformación pertinentes se determinará la HC y la Huella Ecológica Corporativa.

7. Cálculo de la Huella de Carbono y la Huella Ecológica de Producto

Se realiza la evaluación del impacto a lo largo de las diferentes fases del ciclo de vida. La asignación final de cargas se realiza en función del volumen anual de producción. En caso de que la organización en estudio genere diferentes tipologías de producto, se debe aplicar los criterios de asignación que se consideren oportunos. Se propone la intensidad energética como criterio para la realización de dicho reparto.

8. Interpretación de resultados y evaluación de la incertidumbre

Los resultados de cálculo deben ser interpretados para las distintas fases del ciclo de vida identificando los procesos más significativos. Se evaluará además la integridad, sensibilidad y consistencia por medio del cálculo de la incertidumbre. Finalmente se realizarán conclusiones sobre las limitaciones.

9. Análisis de alternativas y propuestas de mejoras

Una vez realizada la cuantificación de emisiones de GEI para las distintas fases, se evalúan posibles reducciones en las emisiones e incrementos en las absorciones de GEI. Para ello se pueden considerar nuevas configuraciones alternativas de productos así como sistemas de fabricación y logística en búsqueda de una reducción en la HC.



Finalmente se elabora un plan de mejoras basado en las categorías de consumos de MC3. Además se identifican posibles proyectos de reducción de emisiones.

10. Informe de Huella de Carbono

La organización debe preparar un informe de HC a fin de documentar los resultados, facilitar la verificación e informar a los usuarios internos y externos que lo soliciten. Los informes deben ser completos, coherentes, precisos, oportunos y transparentes. Se debe demostrar que se ha cumplido con las disposiciones de la norma ISO 14064 y/o especificación técnica ISO/TS 14067. Dada la duplicidad de estándares, deberá elaborarse un informe específico para cada estándar que se desee considerar. Por tanto se elaborará un informe específico de acuerdo con la norma ISO 14064 y un informe por unidad funcional de acuerdo con la especificación técnica ISO/TS 14067.



ANEXO II: Inventario general de consumos de la herramienta del MC3

Tabla AII.1: Inventario general de consumos de la herramienta del MC3.....x



Tabla AII.1: Inventario general de consumos de la herramienta del MC3.

División	Subdivisión	Categoría	Unidades
1. Emisiones directas	1.1. Combustibles	Hulla (combustión)	€
		Leña (combustión)	€
		Biomasa forestal	€
		Biomasa agrícola	€
		Gas Natural	m ³
		GLP envasado	m ³
		GLP canalizado	m ³
		Gasolina 95	l
		Gasolina 98	l
		Gasoil A	l
		Gasoil B	l
		Gasoil C	l
		Fuelóleo	l
		Biodiesel 100%	l
		Bioetanol 100%	l
	1.2. Otras emisiones directas	Pueden provenir de diversas fuentes: depósitos para invernaderos, inyección de CO2 en tanques de acuicultura (fitoplancton), diversas tecnologías de almacenamiento y captura de CO2 (depósito, oleoducto, tratamiento, etc.).	
2. Emisiones indirectas	2.1. Electricidad	Térmica (hulla + antracita)	kWh
		Ciclo Combinado	kWh
		Nuclear (combustión)	kWh
		Hidráulica	kWh
		Mini-hidráulica	kWh
		Cogeneración MCIA	kWh
		Eólica	kWh
		Fotovoltaica	kWh
		Solar térmica	kWh
		Biomasa	kWh
		Residuos	kWh
3. Otras emisiones indirectas. Materiales no orgánicos	3.1. Materiales de flujo (mercancías)	Materias primas (áridos-mineral en general)	€
		Cemento	€
		Ladrillos, cerámica y material refractario	€



División	Subdivisión	Categoría	Unidades
		Derivados del vidrio	€
		Material de porcelana y sanitarios cerámicos	€
		Productos derivados del plástico	€
		Material textil sintético semi-elaborado	€
		Vestuario y textil sintético confeccionado	€
		Combustibles y aceites minerales, bituminosos, etc.	€
		Productos químicos, higiénicos y limpieza; pinturas vegetales, etc.	€
		Perfumería, cera, betún, pinturas sintéticas y barnices sintéticos	€
		Abonos	€
		Productos farmacéuticos	€
		Productos básicos del hierro o del acero	€
		Productos básicos del cobre o níquel	€
		Productos básicos del aluminio y derivados	€
		Manufacturas del hierro, acero y otros metales corrientes (no aluminio), utensilios y herramientas	€
		Mobiliario y carruajes de hierro o acero y otros materiales sintéticos	€
		Miscelánea manufacturas, mat. oficina	€
		Maquinaria industrial y grandes equipamientos (y sus partes)	€
		Aparatos eléctricos comunes, iluminación, electrodomésticos	€
		Vehículos transporte (tierra, mar y aire), artefactos flotantes automóviles terrestres y tractores (y sus partes)	€
		Aparatos eléctricos de precisión, ordenadores, móviles, calculadoras, etc.	€
	3.2. Materiales no amortizables	Materias primas (áridos-mineral en general)	€
		Cemento	€
		Ladrillos, cerámica y material refractario	€
		Derivados del vidrio	€
		Material de porcelana y sanitarios cerámicos	€
		Productos derivados del plástico	€
		Material textil sintético semi-elaborado	€



División	Subdivisión	Categoría	Unidades
		Vestuario y textil sintético confeccionado	€
		Combustibles y aceites minerales, bituminosos, etc.	€
		Productos químicos, higiénicos y limpieza; pinturas vegetales, etc.	€
		Perfumería, cera, betún, pinturas sintéticas y barnices sintéticos	€
		Abonos	€
		Productos farmacéuticos	€
		Productos básicos del hierro o del acero	€
		Productos básicos del cobre o níquel	€
		Productos básicos del aluminio y derivados	€
		Manufacturas del hierro, acero y otros metales corrientes (no aluminio), utensilios y herramientas	€
		Mobiliario y carruajes de hierro o acero y otros materiales sintéticos	€
		Miscelánea manufacturas, materiales oficina	€
		Maquinaria industrial y grandes equipamientos (y sus partes)	€
		Aparatos eléctricos comunes, iluminación, electrodomésticos	€
		Vehículos transporte (tierra, mar y aire), artefactos flotantes automóviles terrestres y tractores (y sus partes)	€
		Aparatos eléctricos de precisión, ordenadores, móviles, calculadoras, etc.	€
	3.3. Materiales amortizables	Materias primas (áridos-mineral en general)	€
		Cemento	€
		Ladrillos, cerámica y material refractario	€
		Derivados del vidrio	€
		Material de porcelana y sanitarios cerámicos	€
		Productos derivados del plástico	€
		Material textil sintético semi-elaborado	€
		Vestuario y textil sintético confeccionado	€
		Combustibles y aceites minerales, bituminosos, etc.	€
		Productos químicos, higiénicos y limpieza;	€



División	Subdivisión	Categoría	Unidades
		pinturas vegetales, etc.	
		Perfumería, cera, betún, pinturas sintéticas y barnices sintéticos	€
		Abonos	€
		Productos farmacéuticos	€
		Productos básicos del hierro o del acero	€
		Productos básicos del cobre o níquel	€
		Productos básicos del aluminio y derivados	€
		Manufacturas del hierro, acero y otros metales corrientes (no aluminio), utensilios y herramientas	€
		Mobiliario y carruajes de hierro o acero y otros materiales sintéticos	€
		Miscelánea manufacturas, mat. oficina	€
		Maquinaria industrial y grandes equipamientos (y sus partes)	€
		Aparatos eléctricos comunes, iluminación, electrodomésticos	€
		Vehículos transporte (tierra, mar y aire), artefactos flotantes automóviles terrestres y tractores (y sus partes)	€
		Aparatos eléctricos de precisión, ordenadores, móviles, calculadoras, etc.	€
	3.4. Materiales amortizables ("matriz de obras")	Energía (gasoil)	€
		Cemento	€
		Productos siderúrgicos	€
		Ligantes bituminosos	€
		Ladrillos y refractarios	€
		Madera	€
		Cobre	€
	3.5. Uso infraestructuras públicas ("matriz de obras públicas")	Energía (gasoil)	€
		Cemento	€
		Productos siderúrgicos	€
		Ligantes bituminosos	€
		Ladrillos y refractarios	€
		Madera	€
		Cobre	€
4. Servicios y contrata	4.1. Servicios con baja movilidad	Servicios externos de oficina, asesorías, etc.	€
		Servicios de oficina de alto valor añadido	€



División	Subdivisión	Categoría	Unidades
		Servicios de hospedería, hoteles	€
		Telefonía (total fijos y móviles)	€
		Servicios médicos	€
		Servicios culturales, sociales, ocio, cooperación, deportes	€
		Formación externa	€
		Servicios interiores de limpieza, mantenimiento y similares	€
		Alquileres polígonos industriales, dominio público y similares	€
		Alquileres centros comerciales y "comunitarios"	€
	4.2. Servicios con alta movilidad	Servicios exteriores de limpieza, mantenimiento y similares	€
		Correo, paquetería, mensajería	€
	4.3. Servicios de transporte de personas	Taxi	€
		Autobús	€
		Tren	€
		Avión	€
		Barco nacional	€
	4.4. Servicios de transporte de mercancías	Furgonetas y similares	€
		Camiones	€
		Ferrocarril	€
		Avión	€
		Buque nacional (portacontenedores)	€
		Buque internacional (portacontenedores)	€
	4.5. Uso de infraestructuras públicas	IVA declarado	€
		Impuesto sociedades	€
		Impuestos especiales	€
		Otros impuestos o tributos	€
		Multas y sanciones	€
5. Recursos agrícolas y pesqueros	5.1. Productos de flujo (mercancías) 5.1.1. Vestuario y manufacturas	Manufacturas del esparto, cestería	€
		Material textil natural (primera elaboración)	€
		Vestuario y textil confeccionado de algodón	€
		Vestuario y textil confeccionado de lana	€
		Manufactura del cuero y pieles; marroquinería, peletería	€



División	Subdivisión	Categoría	Unidades
		Bovino (pastos)	€
		Bovino (cultivos)	€
		Ovino-caprino (pastos)	€
	5.1. Productos de flujo (mercancías) 5.1.2. Productos agropecuarios	Animales vivos	€
		Carnes (aves)	€
		Carnes (cerdo, pastos)	€
		Carnes (cerdo, cultivos)	€
		Carnes (bovino, pastos)	€
		Carnes (bovino, cultivos)	€
		Carnes (ovino-caprino, pastos)	€
		Pescados, crustáceos y moluscos (fresco o congelado)	€
		Leche, lácteos	€
		Huevos	€
		Resto de productos de origen animal	€
		Plantas y flores vivas o cortadas, bulbos	€
		Legumbres, hortalizas, raíces y tubérculos (frescas)	€
		Ídem (congelados, conserva...), tomates	€
		Frutas y frutos secos	€
		Café, té, especias, cacao y sus preparados	€
		Cereales, harinas, pan, pastas, arroz	€
		Gomas, resinas y extractos vegetales	€
		Aceite vegetal	€
		Azúcares, miel y confitería	€
		Preparados de pescado, mariscos, invertebrados	€
		Preparados de carne	€
		Preparados de cereales	€
		Preparados de hortalizas o frutas	€
		Preparados alimenticios diversos	€
		Bebidas con y sin alcohol (zumos, mermeladas)	€
		Tabaco y sucedáneos elaborados	€
		Piensos y alimentos para animales, paja y forraje	€
	5.2. Productos para consumo 5.2.1. Vestuario y	Manufacturas del esparto, cestería	€
		Material textil natural (primera elaboración)	€



División	Subdivisión	Categoría	Unidades
	manufacturas	Vestuario y textil confeccionado de algodón	€
		Vestuario y textil confeccionado de lana	€
		Manufactura del cuero y pieles; marroquinería, peletería	€
		Bovino (pastos)	€
		Bovino (cultivos)	€
		Ovino-caprino (pastos)	€
	5.2. Productos para consumo 5.2.2. Productos agropecuarios	Animales vivos	€
		Carnes (aves)	€
		Carnes (cerdo, pastos)	€
		Carnes (cerdo, cultivos)	€
		Carnes (bovino, pastos)	€
		Carnes (bovino, cultivos)	€
		Carnes (ovino-caprino, pastos)	€
		Pescados, crustáceos y moluscos (fresco o congelado)	€
		Leche, lácteos	€
		Huevos	€
		Resto de productos de origen animal	€
		Plantas y flores vivas o cortadas, bulbos	€
		Legumbres, hortalizas, raíces y tubérculos (frescas)	€
		Ídem (congelados, conserva...), tomates	€
		Frutas y frutos secos	€
		Café, té, especias, cacao y sus preparados	€
		Cereales, harinas, pan, pastas, arroz	€
		Gomas, resinas y extractos vegetales	€
		Aceite vegetal	€
		Azúcares, miel y confitería	€
		Preparados de carne	€
		Preparados de pescado, mariscos, invertebrados	€
		Preparados de cereales	€
		Preparados de hortalizas o frutas	€
		Preparados alimenticios diversos	€
		Bebidas con y sin alcohol (zumos, mermeladas)	€
		Tabaco y sucedáneos elaborados	€



División	Subdivisión	Categoría	Unidades
	5.3. Servicios de restaurante	Pensos y alimentos para animales, paja y forraje	€
		Comidas de empresa	€
		Servicio de restaurante	€
		Alimentos	€
		Carnes	€
		Pollo, aves	€
		Cerdo, embutidos (pastos)	€
		Cerdo, embutidos (cultivos)	€
		Bovino (pastos)	€
		. Bovino (cultivos)	€
		Ovino-caprino (pastos)	€
		Pescados y mariscos	€
		Cereales, harinas, pastas, arroz, pan	€
		Bebidas (zumos, vino, alcoholes)	€
		Legumbres, hortalizas, raíces y tubérculos	€
		Azúcares, dulces, turrones	€
		Aceites y grasas	€
		Lácteos (quesos, nata, leche)	€
		Cafés, té, cacao	€
6. Recursos forestales	6.1. Materiales de flujo (mercancías)	Trozas de madera, puntales, pilotes, estiba, pallets, traviesas, etc.	€
		Madera cortada, aserrada, cepillada	€
		Chapas de madera	€
		Madera contrachapada, paneles	€
		Artículos manufacturados de madera (no muebles)	€
		Mobiliario con base principal de madera	€
		Pasta de madera u otras fibras celulósicas	€
		Papel, cartón y sus manufacturas	€
		Papel, cartón y sus manufacturas reciclado	€
		Productos editoriales, prensa e industria gráfica	€
		Productos editoriales en papel reciclado	€
		Manufacturas del corcho	€
		Manufacturas del caucho natural	€
	6.2. Materiales no amortizables	Trozas de madera, puntales, pilotes, estiba, pallets, traviesas, etc.	€



División	Subdivisión	Categoría	Unidades
		Madera cortada, aserrada, cepillada	€
		Chapas de madera	€
		Madera contrachapada, paneles	€
		Artículos manufacturados de madera (no muebles)	€
		Mobiliario con base principal de madera	€
		Pasta de madera u otras fibras celulósicas	€
		Papel, cartón y sus manufacturas	€
		Papel, cartón y sus manufacturas reciclado	€
		Productos editoriales, prensa e industria gráfica	€
		Productos editoriales en papel reciclado	€
		Manufacturas del corcho	€
		Manufacturas del caucho natural	€
	6.3. Materiales amortizables	Trozas de madera, puntales, pilotes, estiba, pallets, traviesas, etc.	€
		Madera cortada, aserrada, cepillada	€
		Chapas de madera	€
		Madera contrachapada, paneles	€
		Artículos manufacturados de madera (no muebles)	€
		Mobiliario con base principal de madera	€
		Pasta de madera u otras fibras celulósicas	€
		Papel, cartón y sus manufacturas	€
		Papel, cartón y sus manufacturas reciclado	€
		Productos editoriales, prensa e industria gráfica	€
		Productos editoriales en papel reciclado	€
		Manufacturas del corcho	€
		Manufacturas del caucho natural	€
7. Agua	7.1. Consumo de agua potable	Uso alimentario	m ³
		Uso sanitario y lavado	m ³
		Uso de hidrantes (anti-incendios)	m ³
		Riego de jardines	m ³
		Riegos agrícolas	m ³
		Riego anti-polvo (viales, graneles...)	m ³
		Procesos industriales	m ³
	7.1. Consumo de	Térmica (hulla + antracita)	kWh



División	Subdivisión	Categoría	Unidades
	agua potable Consumo eléctrico por CV del agua potable	Ciclo Combinado	kWh
		Nuclear (combustión)	kWh
		Hidráulica	kWh
		Mini-hidráulica	kWh
		Cogeneración MCIA	kWh
		Eólica	kWh
		Fotovoltaica	kWh
		Solar térmica	kWh
		Biomasa	kWh
		Residuos	kWh
	7.2. Consumo de agua no potable	Uso sanitario y lavado	m ³
		Uso de hidrantes (anti-incendios)	m ³
		Riego de jardines	m ³
		Riegos agrícolas	m ³
		Riego anti-polvo (viales, graneles...)	m ³
		Procesos industriales	m ³
	7.2. Consumo de agua potable Consumo eléctrico por CV del agua no potable	Térmica (hulla + antracita)	kWh
		Ciclo Combinado	kWh
		Nuclear (combustión)	kWh
		Hidráulica	kWh
		Mini-hidráulica	kWh
		Cogeneración MCIA	kWh
		Eólica	kWh
		Fotovoltaica	kWh
		Solar térmica	kWh
		Biomasa	kWh
		Residuos	kWh



ANEXO III: Disco Compacto

AIII.1: Herramienta MC3 versión 2.0

AIII.2: Herramienta Carbonfeel-MC3 versión 12.3

AIII.3: Herramienta Bookfeel.076.0000.BRL.00

AIII.4: Herramienta Bookfeel.724.0000.EUR.00

AIII.5: MC3 versión 2.0 – Forestry Faculty

AIII.6: Carbonfeel-MC3 versión 12.3 – Wood Pallets

AIII.7: Código Matlab ®_Isolating Economies